



# Optimalizace filtračních vlastností netkaných filtrů

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 – Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T073 – Produktové inženýrství  
*Autor práce:* **Bc. Nikola Kozáková**  
*Vedoucí práce:* Ing. Ondřej Novák, Ph.D.





# Optimalization of filtration properties of nonwoven filters

## Master thesis

*Study programme:* N3957 – Industrial Engineering  
*Study branch:* 3901T073 – Product Engineering  
*Author:* **Bc. Nikola Kozáková**  
*Supervisor:* Ing. Ondřej Novák, Ph.D.





## Zadání diplomové práce

# Optimalizace filtračních vlastností netkaných filtrů

*Jméno a příjmení:* **Bc. Nikola Kozáková**  
*Osobní číslo:* T17000051  
*Studijní program:* N3957 Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* Produktové inženýrství  
*Zadávající katedra:* Katedra hodnocení textilií  
*Akademický rok:* **2017/2018**

### Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši zaměřenou na teoretický popis filtrace. Zaměřte se zejména na filtraci kapalin.
2. Navrhněte možnosti zlepšující filtrační vlastnosti kapalinových filtrů.
3. Vybraný návrh realizujte a experimentálně ověřte.
4. Získané výsledky diskutujte. Zabývejte se i aplikovatelností filtru (oblastmi využití) v závislosti na zjištěných filtračních vlastnostech.
5. V případě potřeby navrhněte optimalizaci konstrukce/struktury filtračního média.



Rozsah pracovní zprávy:

50 – 60 stran

Forma zpracování práce:

tištěná/elektronická



#### Seznam odborné literatury:

- [1] ŠULC, Jaroslav a Jiří ŠINTÁK. Právní problematika a ochrana životního prostředí (Ochrana životního prostředí). Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1990. ISBN 80-7083-027-1.
- [2] CHEREMISINOFF, Nicholas P. Handbook of Water and wastewater treatment technologies. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 0-7506-7498-9.
- [3] RAMAKRISHNA, Seeram. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers. Singapore Hackensack: World Scientific, 2005. ISBN 981-256-415-2.
- [4] HORNYCH, Petr. Návrh a realizace zařízení pro testování vodních filtrů textilního charakteru. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.

Vedoucí práce:


Ing. Ondřej Novák, Ph.D.  
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání práce:

16. března 2018


Předpokládaný termín odevzdání:

18. dubna 2019

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka

V Liberci 18. března 2019



  
doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

17. 4. 2019

Bc. Nikola Kozáková



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Ondřejovi Novákovi, Ph.D., z Katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů Technické univerzity v Liberci, za odborné rady, cenné připomínky a podmínky k zamyšlení, a také za čas, který mi věnoval při vypracování práce. Dále mé poděkování patří Ing. Jakubovi Hrůzovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Jandurovi za pomoc a rady při měření na laboratorních zařízeních.

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá optimalizací filtračních vlastností netkaných filtrů. Práce obsahuje návrhy možností zlepšení filtračních vlastností a konstrukcí výsledného filtru. Vybraná možnost je experimentálně ověřena. Ověření bylo zaměřeno na filtrační účinnost, tlakové a průtokové charakteristiky. Cílem práce je hlavně zvýšení filtrační účinnosti při zachování stávajících parametrů tlaku, tlakového spádu a průtoku nebo při jejich minimálních změnách.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

kapalinová filtrace, filtrační vlastnosti, filtrační účinnost, nanovláknenná vrstva

## **ANNOTATION**

The diploma thesis deals with optimization of filtering properties of nonwoven filters. The thesis contains suggestions of possibilities of improvement of filtration properties and construction of final filter. The selected option is experimentally verified. The verification was focused on filtration efficiency, pressure and flow characteristics. The main goal of the thesis is to increase the filtration efficiency while maintaining the existing parameters of pressure, pressure gradient and flow or at their minimal changes.

## **KEY WORDS**

liquid filtration, filtration properties, filtration efficiency, nanofibers layer

## OBSAH

|  |    |
|--|----|
| 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE.....   | 8  |
| 2. REŠERŠNÍ ČÁST .....   | 11 |
| 2.1 Teorie filtrace .....  | 11 |
| 2.2 Netkané filtry .....   | 14 |
| 2.3 Filtrační vlastnosti .....   | 15 |
| 2.4 Filtrační trať pro kapalinovou filtraci .....                          | 18 |
| 3. MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ .....                          | 20 |
| 3.1 Návrhy možností zlepšení .....   | 21 |
| 3.2 Výběr nejvhodnějšího návrhu .....                                      | 25 |
| 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....   | 28 |
| 4.1 Nanovlákná vrstva .....  | 28 |
| 4.2 Konstrukce výsledného filtru .....                                     | 36 |
| 4.3 Ověřování filtračních vlastností .....                                 | 37 |
| 4.3.1 Stanovení filtrační účinnosti .....                                  | 39 |
| 4.3.2 Možnosti aplikace nanovlákné vrstvy - tvorba výsledného filtru ..... | 48 |
| 4.3.3 Měření tlaku, tlakového spádu a průtoku výsledných filtrů.....       | 51 |
| 5. DISKUZE .....   | 59 |
| 6. ZÁVĚR.....  | 61 |
| 7. LITERATURA .....  | 62 |
| 8. SEZNAM PŘÍLOH .....   | 63 |
| 9. SEZNAM OBRÁZKŮ.....   | 64 |
| 10. SEZNAM TABULEK .....   | 66 |



## 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je optimalizace filtračních vlastností netkaných filtrů pro kapalinovou filtraci s dosažením vyšší filtrační účinnosti s minimální změnou tlakového spádu a průtoku.

Rešeršní část obsahuje studium teorie filtrace (typy a mechanismy filtrace), filtračních vlastností (filtrační účinnost, tlakový spád, životnost filtru) a porozity. Dále jsou zde popsány netkané filtry a jejich rozdělení dle konstrukce. V závěru rešeršní části je uveden stručný popis filtrační tratě, na které jsou modifikované filtry testovány.

V další části je uveden přehled všech možností pro zlepšení filtračních vlastností filtrů. Dále jsou navrženy varianty realizovatelné na výchozích filtrech. Vzhledem k jednotlivým vlastnostem návrhů byla zvolena nejvhodnější varianta modifikace tj. použití nanovlákněné vrstvy<sup>1</sup>.

Experimentální část je zaměřena na výrobu a analýzu nanovlákněných vrstev o různých parametrech a stanovení posloupnosti materiálů výsledného filtru. Prvním krokem je stanovení filtrační účinnosti na originálních netkaných filtrech, nanovlákněných vrstvách s podkladovou textilií a jejich kombinace. Na základě výsledků je vybrána nejvhodnější nanovlákněná vrstva vhodná k modifikaci výchozího filtru. Kapitola také obsahuje návrhy, jak nanovlákněnou vrstvu aplikovat na výchozí netkaný filtr. Filtry jsou testovány z hlediska průtoku a tlakových charakteristik na filtrační trati pro kapalinovou filtraci.

---

<sup>1</sup> Pokud se v práci hovoří o nanovlákněné vrstvě jedná se o nanovlákněnou vrstvu nanosenou na podkladovou textilii, kterou tvořila polypropylenová netkaná textilie typu spunbond. Výjimku tvoří pouze kapitola *Analýza nanovlákněné vrstvy*, kdy je analyzována samostatná nanovlákněná vrstva bez podkladové textilie

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                      |   |
|----------------------|---|
| % hm                 | procent z hmotnosti   |
| °C                   | stupně Celsia   |
| μl                   | mikrolitr ( $10^{-6}$ l)                                    |
| μm                   | mikrometr ( $10^{-6}$ m)                                    |
| bar                  | jednotka tlaku ( $10^5$ Pa)                                 |
| C                    | uhlík   |
| cos                  | kosinus   |
| ČSN EN ISO           | České technické normy                                       |
| g                    | gram ( $10^{-3}$ kg)  |
| g.m <sup>-2</sup>    | jednotka plošné hmotnosti                                   |
| H                    | vodík   |
| HCOOH                | chemický vzorec kyseliny octové                             |
| CH <sub>3</sub> COOH | chemický vzorec kyseliny mravenčí                           |
| kg.m <sup>-3</sup>   | jednotka měrné hmotnosti                                    |
| KNT                  | katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů      |
| kV                   | kilovolt ( $10^3$ V)  |
| l.s <sup>-1</sup>    | litr za sekundu (jednotka průtoku)                          |
| m                    | jednotka délky  |
| m <sup>3</sup>       | jednotka objemu   |
| mg                   | miligram ( $10^{-6}$ kg)                                    |
| mg.m <sup>-3</sup>   | miligram na metr krychlový ( $10^{-6}$ kg.m <sup>-3</sup> ) |
| min                  | minuta  |

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $\text{min}^{-1}$                 | otáčky za minutu                              |
| ml                                | mililitr ( $10^{-3}$ l)                       |
| mm                                | milimetr ( $10^{-3}$ m)                       |
| $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ | jednotka rychlosti posuvu dávkovače           |
| $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$   | jednotka rychlosti odtahu podkladové textilie |
| MPa                               | megapascal ( $10^6$ Pa)                       |
| N                                 | dusík   |
| $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$    | jednotka povrchového napětí                   |
| NT                                | netkaná textilie                              |
| NTU                               | jednotka zákalu                               |
| O                                 | kyslík  |
| Pa                                | Pascal (jednotka tlaku)                       |
| PA 6                              | polyamid 6                                    |
| PL                                | polyester                                     |
| PP                                | polypropylen                                  |
| tzn.                              | to znamená                                    |
| tzv.                              | takzvaný                                      |

## **2. REŠERŠNÍ ČÁST**

V rešeršní části práce je popsána teorie filtrace, mechanismy filtrace, filtrační vlastnosti a porozita. V další části jsou popsány netkané filtry, kterými se tato práce zabývá a druhy filtrů rozdělené podle jejich konstrukce. V závěru je popsána filtrační trať pro kapalinovou filtraci, která slouží k testování textilních filtrů rukávcového tvaru.

### **2.1 Teorie filtrace**

Obecně je filtrace separační metoda, při které se oddělují dispergované částice z disperzního prostředí za pomoci porézního média – filtru. Disperzní prostředí může tvořit plyn či kapalina, potom hovoříme o kapalinové filtraci. Částice mohou být zachytávány buď na povrchu filtru nebo uvnitř filtru. Dle způsobu zachytu částice potom dělíme filtraci na povrchovou a hloubkovou.

Při povrchové filtraci jsou částice zachytávány pouze na povrchu filtru, který se postupně zanáší. S postupným zanášením roste tlakový spád. Navíc jsou při této filtraci zachytávány pouze ty částice, které jsou větší, než póry filtru, menší částice póry projdou. Výhodou této filtrace jsou možnosti regenerace filtru.

Naopak při hloubkové filtraci se zachytávají částice i uvnitř filtru. Tyto filtry mají větší tloušťku oproti filtrům pro povrchovou filtraci. Navíc jsou zachytávány i částice, které jsou menší než póry filtru. Částice filtr postupně zanášejí, čímž zmenšují jeho póry a filtr je tak schopen zachytit stále menší částice. Stejně jako u povrchové filtrace i zde při postupném zanášení filtru dochází k růstu tlakového spádu. Na rozdíl od povrchové filtrace není, při tomto typu filtrace, možnost filtr regenerovat.

U kapalinové filtrace se objevuje spíše povrchová filtrace, tzv. síťový efekt. Podstatou síťového efektu je fakt, že dochází k zachycení částic, které mají větší rozměry než jsou rozměry pórů. Představiteli těchto filtrů jsou například tkaniny, kde lze velikost póru nastavit pomocí dostavy, vpichované netkané textilie či netkané textilie typu spunbond.

[1]

Existuje několik dalších principů filtrace, ty se liší v principu zachycení částic a velikostí částic, které jsou schopny zachytit. Tyto principy se objevují spíše u hloubkové filtrace.

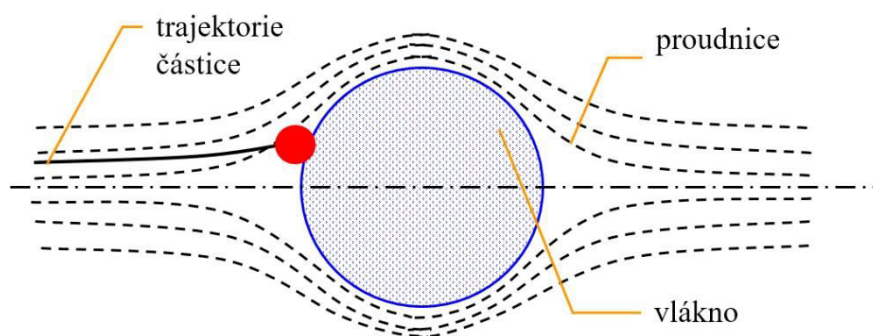
### a) Setrvačný princip

Tento princip je vhodný pro hmotnější částice, kdy využívá setrvačných sil působících na tyto částice. Působením těchto sil potom částice nesledují trajektorii proudnic a jsou zachytávány filtrem, viz obrázek 1. Čím jsou částice větší a hmotnější, tím více se odchyľují od proudnic. Pomocí Stokesova čísla můžeme určit intenzitu setrvačnosti na níž závisí zachycovací účinnost. Čím vyšší je Stokesovo číslo, tím vyšší je zachycovací účinnost.

Vztah pro výpočet Stokesova čísla:

$$\Psi = \frac{w_p \cdot d_p^2 \cdot \rho_p}{18\eta \cdot d_f} \quad (1)$$

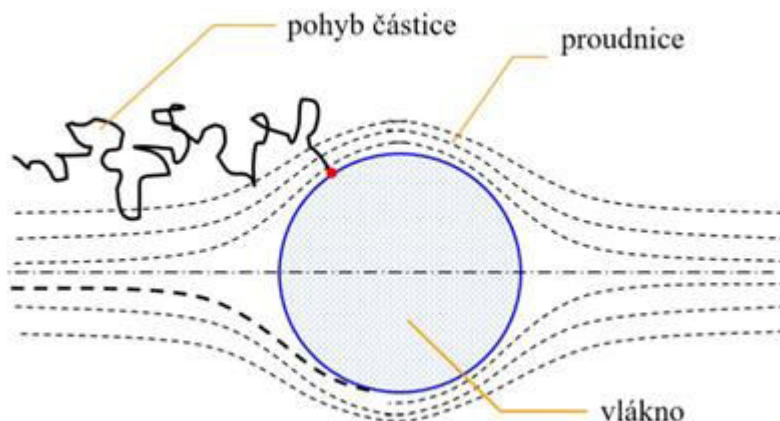
kde  $\Psi$  je Stokesovo číslo,  $w_p$  je rychlost proudění,  $d_p$  je velikost částice,  $\rho_p$  je měrná hmotnost částic,  $\eta$  je viskozita tekutiny a  $d_f$  je velikost vláken. [2]



Obrázek 1 - princip setrvačného zachytu [1]

### b) Difuzní princip

Difuzní princip zachycení částic je vhodný pro částice s velikostí menší než 1  $\mu\text{m}$ , kdy se zmenšující se velikostí částice roste zachycovací účinnost. Toto zvýšení je zapříčiněno difuzními jevy, které jsou podmíněny molekulovou strukturou tekutiny nebo turbulentním prouděním tekutiny. Částice nesledují proudnice a neustále se srážejí. Pohybují se neuspořádaně všemi směry, čímž dochází k jejich zachycení na vláknech filtru, viz obrázek 2. [2]



Obrázek 2 - princip difuzního zachytu [1]

#### c) *Intercepční princip*

Princip spočívá v zachytu částic na filtrační mříži, která je tvořena prostorově upořádanou strukturou vláken.

Jedná se o jeden z případů spadající pod pojem síťový účinek. Ten závisí na tom, zda se uplatňují povrchově aktivní síly působící mezi částicemi a vláknem filtru, a také navzájem mezi částicemi.

V případě, že se tyto síly nevyskytují, dojde k síťovému efektu jen pokud bude vzdálenost mezi vlákny filtru menší než velikost částic. Naopak pokud se povrchově aktivní síly uplatňují, tak částice vytváří řetězce, které přemostí vzdálenost mezi vlákny, jenž je větší než velikost částic. To, jak budou tyto řetězce dlouhé, závisí právě na velikosti povrchově aktivních sil. [2]

#### d) *Elektrostatický princip*

Tento princip je založen na působení elektrostatického pole na částice, které jsou elektricky nabitě. Lze také odlučovat nabitě částice bez elektrostatického pole, a to buď účinkem vlastního náboje částic, nebo pomocí náboje filtru, který má opačnou polaritu. Mohou být odlučovány i nenabitě částice na nabitém filtru, pokud v jeho okolí existuje rostoucí intenzita elektrického pole.

Pro kvalitnější odlučování částic jsou částice uměle nabíjeny. Existují dva mechanismy – nabíjení elektrickým polem a nabíjení difúzí plyných iontů. Nabíjení elektrickým

polem je vhodné pro částice větší než 1  $\mu\text{m}$ . Nabíjení difúzí se uplatňuje pro částice menší než 1  $\mu\text{m}$ .

## 2.2 Netkané filtry

Pro dosažení optimálních filtračních vlastností je v první řadě důležitý vhodný výběr filtračního média - filtru. Filtr musí poskytovat dostatečně velký porézní povrch, na který budou zachytávány částice dispergované v kapalině, zároveň však musí filtr umožňovat dostatečný průtok filtrované kapaliny. Současně musí zajišťovat dostatečnou čistotu filtrované kapaliny. Jedním z typů filtrů, které toto poskytují, jsou netkané filtry.

Netkané filtry se mohou vyrábět z přírodních vláken (bavlna, vlna), syntetických vláken nebo jejich kombinací. Nejčastější technologií pro výrobu těchto filtrů je technologie vpichování, kdy dochází k provázání vláken vlivem průchodu jehly. Soudržnost vláken je zajištěna jejich třením a není třeba používat dodatečná pojiva. Filtry se používají v různém provedení. Mohou to být tenké filtry určené pro povrchovou filtraci nebo objemné pro filtraci hloubkovou.

Filtry vyrobené ze syntetických vláken (PP, PL, PA 6) se většinou používají pro povrchovou filtraci a vzhledem k jejich relativně nízké pořizovací ceně jsou po zanesení povrchu nahrazovány, tzn. nedochází k regeneraci filtru. Mohou být také konstruovány tak, že ve směru proudící kapaliny dochází ke zmenšování pórů. To umožňuje zachycení nečistot různých rozměrů.

Pro podporu textilních filtrů se používají děrované plechy a síta. Ty mohou zároveň sloužit i jako filtry pro oddělení velmi hrubých částic nebo pro vysokoteplotní filtraci. Vyrábějí se z oceli, bronzu, mědi, niklu a různých slitin.

Další možností jak filtrovat kapalinu je použití sypkých filtračních materiálů. Těchto typů filtračních médií se využívá nejčastěji při filtraci vody ať už odpadních v čistíčkách odpadních vod nebo při filtraci vody pitné. Nejpoužívanější je křemenný písek a štěrk, který se používá ve vrstvách o tloušťce několika centimetrů až několika stop. Záleží na požadavcích na filtraci. Mezi další materiály patří například uhlí a koks či drcený kámen nebo cihla. [3]

### *Druhy filtrů:*

Filtry lze dělit dle jejich filtrační účinnosti nebo dle jejich tvaru. Zde je uvedeno základní dělení dle tvaru filtrů.

#### *- ploché filtry*

Jedná se o nejjednodušší typ filtrů. Mohou být použity pro povrchovou i hloubkovou filtraci, záleží na jejich tloušťce. Mezi filtry pro hloubkovou filtraci lze zařadit objemné netkané textilie pojené termicky či chemicky.

#### *- skládané filtry*

Jedná se o ploché filtry složené do tvaru "harmoniky". Vytvořený filtr je nutno umístit do pevného rámu, který bude zajišťovat tvar filtru. Z toho plynou vyšší prostorové nároky.

#### *- hadicové filtry*

Filtry jejichž délka je větší než průměr. Mohou být ve tvaru hadice či rukávce. Filtrované nečistoty jsou zachytávány na povrchu filtru. Tyto filtry jsou určeny pro průmyslovou filtraci.

#### *- bubnové filtry*

Filtry pro povrchovou filtraci. Konstrukci tvoří perforovaný buben z jedné strany pokrytý filtračním materiálem. Kapalina prochází zvenčí dovnitř nebo naopak, dle konstrukčního řešení. Nečistoty zachycené na povrchu filtru lze odstranit pomocí odsátí.

#### *- diskové filtry*

Tyto filtry mají tvar dutého disku a uplatňuje se u nich pouze povrchová filtrace. Částice, které jsou zachytávány na povrchu filtru lze průběžně odstraňovat. [1]

## **2.3 Filtrační vlastnosti**

Mezi hlavní filtrační vlastnosti patří filtrační účinnost, tlakový spád a životnost. Tyto vlastnosti se průběhu filtrace mění, jelikož dochází k zanášení filtru částicemi, které se usazují mezi vlákny. Mezi vlastnosti, které souvisejí s kvalitou filtru, patří prodyšnost,



pórovitost a velikost filtru. Na filtr dále mohou působit i vnější vlivy – mechanické, chemické, teplotní či jejich kombinace.

#### *a) Filtrační účinnost*

Účinnost neboli odlučivost je množství zachycených částic ku celkovému množství částic. Vypočítá se dle vztahu:

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

kde  $E$  je účinnost filtru,  $G_1$  je množství disperzního podílu, který projde filtrem a  $G_2$  je celkové množství disperzního podílu, které je dávkováno. Pro bezrozměrnost vztahu je nutno dosazovat ve shodných jednotkách. Pro procentní vyjádření je nutno celý vztah vynásobit stem.

Účinnost filtru se s časem zvyšuje. To je dáno tím, že se filtr postupně zanáší částicemi, ty zmenšují póry filtru a tím zvyšují jeho efektivitu. Naopak zanášení způsobuje růst tlaku a tlakového spádu. [4]

Postup stanovení efektivy filtru je uveden v normě ČSN EN ISO 16890-3 (125009). Jedná se o normu pro testování vzdušných filtrů.

Zkušební vzorek je postupně zanášen syntetickým prachem a je sledována změna proudění vzduchu pomocí tlakového spádu. Množství dávkovaného syntetického prachu se váží s přesností  $\pm 1$  g a prach je následně dávkován v koncentraci  $140 \pm 14$  mg.m<sup>-3</sup> do doby, než je dosažena daná hodnota tlakového spádu. Účinnost je stanovena po každé vyčerpané dávce syntetického prachu. Před zastavením testu je třeba uvolnit všechn zachycený prach v podávacím ústrojí. Po zastavení testu je zvážen koncový filtr, aby bylo zjištěno množství prachu, které prošlo zkušebním vzorkem. Jakýkoliv prach usazený v potrubí mezi zkušebním vzorkem a koncovým filtrem musí být zahrnut v konečné hmotnosti koncového filtru. Účinnost je potom spočítána dle uvedeného vztahu (2). [5]

#### *b) Tlakový spád*

Udává odpor, který filtr vyjadřuje vůči toku tekutiny nebo proudu vzduchu. Tlakový spád je dán vztahem:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (3)$$

kde  $p$  je tlakový spád,  $p_1$  tlak před filtrem a  $p_2$  tlak za filtrem.

Tlakový spád se vlivem postupného zanášení filtru mění v čase – zvyšuje se. [4]

#### c) Životnost filtru

Životnost filtru vychází z tlakového spádu. Můžeme ji definovat pomocí jímavosti, což je množství částic, které filtr pojme, než dojde k dosažení maximálního tlakového spádu. Jímavost je dána vztahem:

$$J = E_s \cdot m, \quad (4)$$

kde  $J$  je jímavost,  $E_s$  je střední efektivita a  $m$  množství dávkovaného disperzního podílu do okamžiku, než dojde k překročení maximálního tlakového spádu. [4]

#### d) Porozita

Uvedené filtrační vlastnosti výrazně ovlivňují kvalitu filtru a tím následně i filtraci. Všechny popsané vlastnosti souvisí také s porozitou filtru neboli velikostí pórů ve filtru. Z tohoto důvodu je důležité stanovit nejen porozitu filtru, ale také velikost samotného póru a jeho tvar.

Porozitu lze definovat jako objem vláknenného materiálu nezaplněného vláknem, který je udáván v procentech.

Důležitější, než porozita, je samotná velikost póru a jeho tvar. Pro aplikaci ve filtrech se póry definují jako kruhový průmět do mezi vláknenného prostoru. Dále velikost póru závisí také na použité metodě testování. Mezi testovací metody lze zařadit obrazovou analýzu, kdy lze definovat přesný tvar póru, dále prosévání definovaných částic skrz textilii nebo průnik tekutiny skrz testovanou textilií.

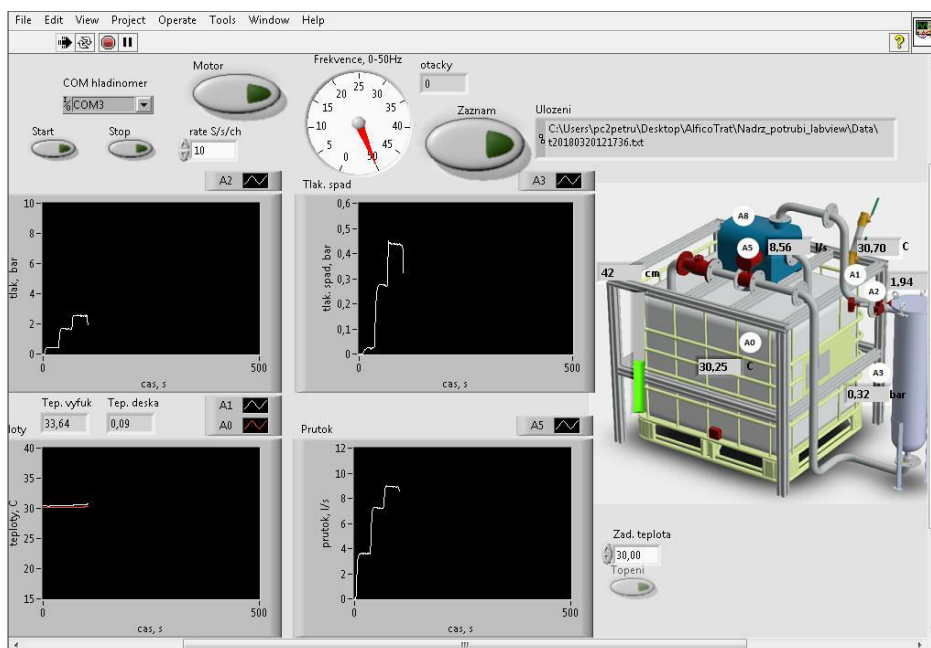
Pro určování velikosti póru pomocí průniku tekutiny se sleduje vztah mezi povrchovým napětím a tlakem, kterým je tekutina vytlačována nebo vtlačována. Existují dvě testovací metody – Mercury porosimetry (nesmáčivá tekutina je vtlačována do textílie) a Bubble point test neboli bublinková metoda (smáčivá tekutina je vytlačována z textílie). [1]

## 2.4 Filtrační trať pro kapalinovou filtraci

Filtrační trať slouží k testování textilních filtrů. Jedná se o zařízení navržené pro testování filtrů rukávového tvaru. Umožňuje simulaci reálných podmínek, při kterých bude následně filtr použit v provozu. Jedná se o kapalinovou filtraci, kde jako filtrační médium slouží voda.

Filtrační trať se skládá z polypropylenové nádrže opatřené ochrannou konstrukcí o objemu 1 m<sup>3</sup>, čerpadla, které umožňuje regulovat průtok pomocí volby otáček, škrtkého ventilu, který umožňuje měnit pracovní tlak, a filtračního tělesa, do kterého jsou vkládány testované filtry. Mezi další komponenty patří průtokoměr, který snímá aktuální hodnotu průtoku, snímač teploty, tlakové čidlo a hladinoměr. Jednotlivé komponenty trati jsou propojeny pomocí polypropylenového potrubí. Fotografie filtrační tratě je na obrázku 4.

Trať je obsluhována pomocí aplikace LabView, která slouží k obsluze čerpadla - vypnutí či zapnutí, případně regulaci otáček, zobrazení aktuálních hodnot tlaku, tlakového spádu a teploty filtračního média. Slouží také k zaznamenávání dat z průběhu filtrační zkoušky. Ukázka z prostředí aplikace je na obrázku 3. Data jsou zaznamenávána do textového dokumentu s příponou *.txt*, který umožňuje export dat do statistických programů pro zpracování dat.



Obrázek 3 - ukázka programu pro obsluhu filtrační tratě [6]

### *Parametry filtrační tratě:*

- maximální průtok až 550 litrů za minutu a možnost tento průtok regulovat
- maximální tlak v okolí filtru 10 bar a možnost měření tlakové spádu
- možnost ohřevu filtračního média do maximální teploty 70°C
- možnost dávkování nečistot do filtračního média

Testované filtry jsou vkládány do filtrační nádoby, která obsahuje perforovaný koš. Tento perforovaný koš tvoří mechanickou podporu filtrů, které jsou do něj vkládány.  
[6]



*Obrázek 4 - filtrační trať [6]*

### 3. MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ

Možnostmi pro zlepšení stávajících filtračních vlastností materiálu může být zvětšení filtrační plochy, zvýšení tloušťky filtru, takže může docházet k zachycení částic uvnitř filtru, zmenšení průměru vláken či použití nanovláken.

Filtrační plocha má výrazný vliv na filtrační vlastnosti. Její zvýšení by mělo vést ke snížení tlakového spádu, zvýšit životnost filtru a pozitivně ovlivnit filtrační účinnost. Možností jak zvýšit filtrační plochu, mimo použití filtru větších rozměrů, je použití skládaných filtrů. Jedná se o filtrační textilií složenou do tvaru harmoniky upevněnou do rámu, který zajišťuje tvar filtru. [4]

Při zvyšování tloušťky filtru lze dosáhnout vyšší filtrační účinnosti při zachování stejného nebo mírného nárůstu tlakového spádu. Při zvyšování tloušťky filtru navíc dochází ke změně z povrchové filtrace na filtraci hloubkovou.

Při zmenšení průměru vláken dochází ke zmenšení velikostí pórů a zvyšování měrného povrchu vláken, čímž je zvyšována filtrační účinnost. Naopak roste tlakový spád, jelikož dochází ke tření na větším povrchu - kapalina musí obtéct více vláken.

Další možností je použití nanovláken. Nanovláknena mají vysoký měrný povrch, čímž zvyšují filtrační účinnost, protože se zvyšuje pravděpodobnost střetu filtrované částice s vláknem filtru. Díky vysokému měrnému povrchu je lze také využít jako nosiče aktivních látek. Vzhledem k nano rozměru průměru vláken mají nanovláknenné vrstvy velmi malé velikosti pórů. Velikost pórů je důležitá právě u kapalinové filtrace, jelikož určuje velikost zachytávaných částic. Velikost pórů závisí také na plošné hmotnosti vrstvy, kdy se, se zvyšující plošnou hmotností zmenšují póry mezi vlákny. Nevýhodou použití nanovláken je nízká životnost filtru, protože vzhledem k malým pórům dojde k rychlému zanesení filtru. Zanesení filtru má za následek růst tlakového spádu a v krajním případě až poškození filtru. Řešením tohoto problému může být aplikace předfiltrů, kdy se před nanovláknenným filtrem nachází soustava netkaných filtrů, které zachytí hrubé nečistoty. [7]

U všech možností na zlepšení filtračních vlastností dojde ke zvýšení filtrační účinnosti, ovšem vždy na úkor některých z ostatních vlastností. Při zvyšování filtrační plochy dochází ke zvyšování konstrukčních rozměrů či nutnosti použití rámu u skládaných filtrů. Při zvyšování tloušťky filtru dochází ke změně z povrchové filtrace na

hloubkovou, což nemusí být žádané. U hloubkové filtrace je ztracena možnost opětovné regenerace filtru. Při zmenšení průměru vláken filtru dochází ke zvýšení tlakového spádu. Také je zde problém s homogenitou povrchu, kvůli obtížnému zpracování tenkých vláken. Nanovláknenné vrstvy mají velmi malé velikosti pórů, což umožňuje zachyt částic různé velikosti. Díky vysokému měrnému povrchu je lze využít jako nosiče aktivních látek. Oproti filtrům z tenkých vláken mají nanovláknenné vrstvy vyšší homogenitu povrchu. Nevýhodou filtrů z nanovláken je jejich nízká životnost, jelikož dochází k jejich rychlému zanesení.

### 3.1 Návrhy možností zlepšení

Pro zlepšení filtračních vlastností byly vybrány netkané filtry, které jsou k dispozici na Technické univerzitě v Liberci. Jedná se o vpichované polypropylenové netkané textilie ve tvaru rukávcových filtrů. Jsou vybrány dvě varianty rukávců, které se liší velikostí pórů. Přehled základních parametrů viz tabulka 1.

Zaplnění a porozita jsou vypočteny dle vzorců

$$\mu = \frac{\rho_{nt}}{\rho_{vl}}, \quad (5)$$

$$p = 1 - \mu, \quad (6)$$

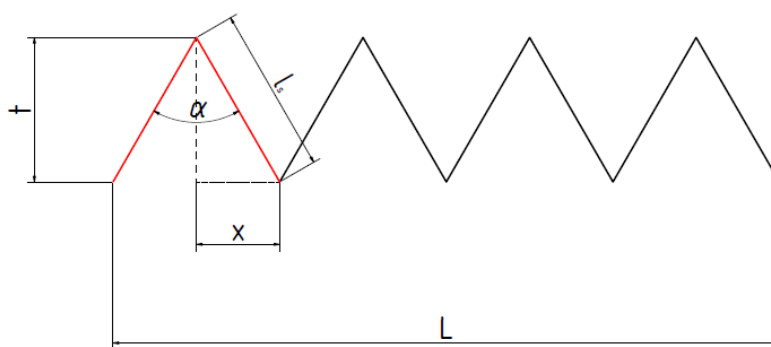
kde  $\mu$  je zaplnění,  $\rho_{nt}$  je hustota netkané textilie,  $\rho_{vl}$  je hustota vláken a  $p$  je porozita.

Tabulka 1 - přehled základních parametrů základních filtrů

| Označení | Materiál     | Měrná hmotnost vláken | Průměr pórů | Tloušťka filtru | Plošná hmotnost | Měrná hmotnost NT | Zaplnění | Porozita |
|----------|--------------|-----------------------|-------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------|----------|
| -        | -            | $[kg.m^{-3}]$         | $[\mu m]$   | $[mm]$          | $[g.m^{-2}]$    | $[kg.m^{-3}]$     | $[\%]$   | $[\%]$   |
| PP 25    | Polypropylen | 940                   | 25          | 2,0             | 350             | 175               | 18,6     | 81,4     |
| PP 50    | Polypropylen | 940                   | 50          | 1,8             | 300             | 167               | 17,8     | 82,2     |

#### a) Skládání

První možností jak zlepšit filtrační vlastnosti je vytvoření skládaného filtru z netkané textilie. Vytvořený skládaný filtr musí být upnut do konstrukce, která udržuje tvar výsledného filtru. Zvyšuje se tloušťka filtru a spotřeba materiálu na vytvoření skládaného filtru. Na obrázku 5 je zobrazeno schéma skládaného filtru.



Obrázek 5 - skládaný filtr

Délku potřebného materiálu na vytvoření skládaného filtru zjistíme pomocí několika výpočtů. Nejdříve určíme polovinu délky skladu  $l_s$  dle vzorce

$$l_s = \frac{t}{\cos \alpha/2}, \quad (7)$$

kde  $t$  je tloušťka filtru a  $\alpha$  je úhel, pod kterým jsou sklady tvořeny. Následně určíme polovinu rozteče skladu dle vzorce

$$x = \sin \alpha/2 \cdot l_s, \quad (8)$$

Pomocí těchto dvou hodnot lze vypočítat koeficient  $k$ , který udává o kolik více materiálu je potřeba na vytvoření skládaného filtru o délce  $L$ .

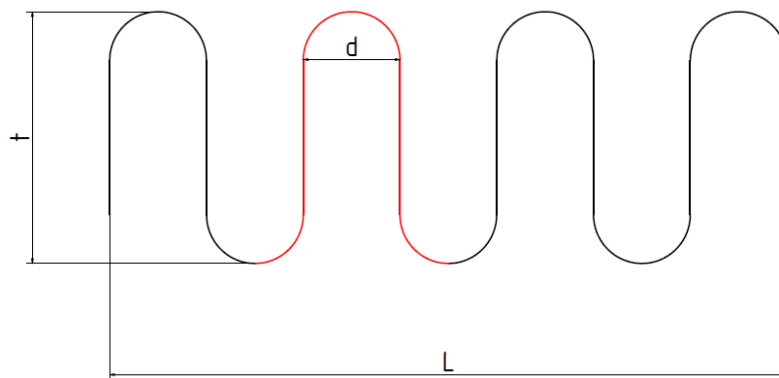
$$k = \frac{l_s}{x}, \quad (9)$$

Délka materiálu potřebná pro vytvoření skládaného filtru je potom

$$l = L \cdot k, \quad (10)$$

kde  $L$  je délka výsledného skládaného filtru.

Extrémním případem je vytvoření skládaného filtru, kdy úhel mezi sklady je téměř nulový, viz obrázek 6.



Obrázek 6 - extrémní případ skládaného filtru

Nejdříve určíme délku skladu  $l_s$  dle vzorce

$$l_s = \pi d + 2(t - d), \quad (11)$$

kde  $d$  je průměr ohybu skladu a  $t$  tloušťka skládaného filtru. Následně je určen koeficient  $k$ , který udává o kolik více materiálu je potřeba na vytvoření skládaného filtru o délce  $L$ .

$$k = \frac{l_s}{2d}, \quad (12)$$

Délka materiálu potřebná pro vytvoření skládaného filtru je

$$l = L \cdot k, \quad (13)$$

kde  $L$  je délky skládaného filtru.

Výhodou skládaného filtru je zvýšení filtrační plochy a tím i životnosti s minimálním vlivem na tlak a tlakový spád.

#### b) Vrstvení

Další možností je vrstvení dostupných netkaných filtrů, viz obrázek 7. Vrstvením se zvýší tloušťka výsledného filtru a dochází k jevu hloubkové filtrace. První vrstvu ve směru proudění kapaliny tvoří filtr s větším průměrem pórů a za ním následuje filtr s menším průměrem pórů. Tím je dosaženo vyšší životnosti filtru a nižšího nárůstu tlakového spádu, jelikož nedojde k rychlému zanesení menších pórů nečistotami. Tato varianta umožňuje vytvoření jak plochých filtrů tak i filtrů rukávcových. Výhodou této konstrukce je kvalitní filtrace v jednom filtračním kroku.

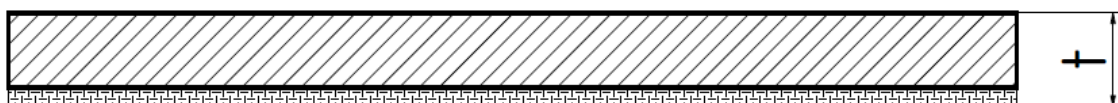




Obrázek 7 - vrstvený filtr

#### c) Aplikace nanovláknenné vrstvy

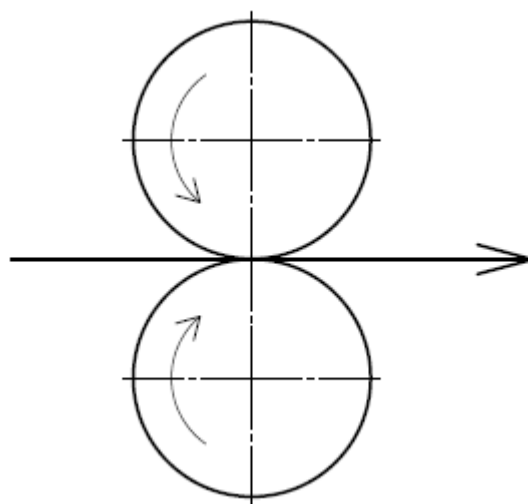
Tato varianta vychází z předchozí možnosti vrstvení filtrů. Druhý filtr s menšími póry zde nahrazuje nanovláknenná vrstva, viz obrázek 8. Díky použití nanovláknenné vrstvy je dosaženo nižší celkové tloušťky filtru a zlepšení filtračních vlastností stávajícího filtru. Netkaný filtr zachytí hrubé částice a zároveň chrání nanovláknennou vrstvu před mechanickým poškozením částicemi větších rozměrů. Nanovláknenná vrstva má obecně velmi dobré filtrační schopnosti. Má ale malou mechanickou odolnost a je nutné ji chránit pro dosažení její dlouhé životnosti.



Obrázek 8 - netkaný filtr s nanovláknennou vrstvou

#### d) Kalandrování

Při kalandrování prochází materiál mezi dvojicí válců, z nichž jeden nebo oba mohou být vyhřívané, viz obrázek 9. Na výsledek kalandrování má vliv přítlak válců, teplota a rychlost odtahu materiálu. Kalandrovací válce mohou být hladké či rastrované. Kalandrováním se snižuje tloušťka materiálu a vlivem tlaku se vlákna zploští, čímž dojde ke zmenšení pórů v netkané textilií. Použitím rastrovaných válců lze zachovat ve větší míře stávající prodyšnost výchozího filtru, jelikož dojde ke spojení pouze v místě rastru.



Obrázek 9 - kalandrování

#### *e) Zátěr*

Zátěrem je myšlen tenký, pevný a pružný film, který je na netkanou textilií aplikován pomocí stěrky či nástřikem, viz obrázek 10. Aplikací zátěru na výchozí netkaný filtr dojde k zacelení pórů a jejich zmenšení. V extrémním případě může vést až k nepropustnosti filtru, čímž se enormně zvýší tlak a může dojít až k mechanickému poškození filtru.



*Obrázek 10 - netkaný filtr se zátěrem*

### **3.2 Výběr nejvhodnějšího návrhu**

Výběr je proveden na základě vlastností jednotlivých návrhů na zlepšení filtračních vlastností.

#### *- náročnost na zástavbové rozměry*

Filtrační vlastnosti jsou zlepšovány na stávajících filtrech, které jsou již používány. Vzhledem k tomu, je nutno zachovat stávající zástavbové rozměry filtrů nebo je měnit pouze minimálně.

#### *- použití podpůrných konstrukcí*

Souvisí se zachováním stávajících zástavbových rozměrů, kdy by použití podpůrné konstrukce mohlo znemožnit umístění filtru na jeho původní místo.

#### *- spotřeba materiálu*

Ekonomické hledisko. Pro zlepšení filtračních vlastností by mělo být použito minimum materiálu.

#### *- možnost regenerace*

Ekonomické hledisko. Návrh na zlepšení filtračních vlastností by měl také zohlednit možnost regenerace filtru, kdy nebude nutno filtr vyhodit.

- *náročnost výroby*

Jelikož se jedná o zlepšování filtračních vlastností stávajících filtrů, měla by být realizace zvoleného návrhu co nejjednodušší.

- *kompatibilita konstrukce s filtrační nádobou*

Vzhledem k tomu, že filtry se zlepšenými filtračními vlastnostmi budou testovány na filtrační trati, která disponuje filtrační nádobou daného tvaru je nutno, aby bylo možno je do nádoby vložit.

- *předpokládaná filtrační účinnost*

Důležitá vlastnost, jelikož se zvýšení filtračních vlastností týká hlavně filtrační účinnosti. Proto je nutno o ní uvažovat již při návrhu.

- *měrný povrch vláken*

Měrný povrch souvisí se schopností zachytávat částice, která se zvyšujícím se měrným povrchem roste. Tato vlastnost také umožňuje aplikaci aktivních látek, pokud by to aplikace použití filtru vyžadovala.

- *možnost realizace na KNT*

Důležitý parametr, jelikož vybraný návrh musí být realizovatelný na KNT.

Vlastnosti jsou hodnoceny pomocí známek, kdy 1 je nejlepší a 5 nejhorší. Návrh s nejnižším součtem známek je následně realizován, viz tabulka 2.

*Tabulka 2 - hodnocení vlastností jednotlivých návrhů*

| Varianta                                     | Skládání | Vrstvení | Nanovrstva | Kalandr | Zátěr |
|--|----------|----------|------------|---------|-------|
| Vlastnost                                    |          |          |            |         |       |
| Náročnost na zástavbové rozměry              | 5        | 3        | 1          | 1       | 1     |
| Použití podpůrných konstrukcí                | 5        | 1        | 1          | 1       | 1     |
| Spotřeba materiálu na výrobu                 | 5        | 3        | 2          | 1       | 2     |
| Možnost regenerace                           | 3        | 5        | 3          | 2       | 2     |
| Náročnost výroby                             | 4        | 1        | 2          | 1       | 3     |
| Kompatibilita konstrukce s filtrační nádobou | 4        | 1        | 1          | 1       | 1     |
| Předpokládaná filtrační schopnost            | 1        | 2        | 1          | 3       | 3     |
| Měrný povrch vláken                          | 2        | 3        | 1          | 5       | 4     |
| Možnost realizace na KNT                     | 5        | 1        | 1          | 5       | 5     |
| Suma   | 34       | 20       | 13         | 20      | 22    |

Na základě ohodnocení vlastností jednotlivých návrhů je zvolena aplikace nanovláknenné vrstvy, která bude v kombinaci s filtrem z netkané textilie tvořit kompaktní filtr s novými filtračními schopnostmi a životností.

Nanovláknenná vrstva bude vyráběna pomocí elektrostatického zvlákňování polymerního roztoku. Elektrostatické zvlákňování je proces, při kterém vznikají velmi jemná vlákna, jejichž průměr se pohybuje do 1 000 nanometrů. Zvlákňovat lze jak roztoky polymerů, tak i polymerní taveniny. Častěji se tímto způsobem zvlákňují polymerní roztoky, a to z důvodu jejich nižší viskozity, která umožňuje vytvářet jemnější vlákna oproti polymerním taveninám a také méně komplikovanému výrobnímu procesu. Zvlákňovány mohou být polymery přírodní i syntetické.

Proces elektrostatického zvlákňování využívá vysokého napětí, díky kterému vzniká elektricky nabitý polymerní roztok. Tento roztok je následně zvlákněn a vznikající vlákna jsou zachytávána na kolektor, který je uzemněn nebo nabíjen potenciálem o opačném náboji. Na zvlákňovací elektrodě dochází k tvorbě tzv. Taylorova kužele, ze kterého vznikají jednotlivá vlákna. Tato vlákna jsou dloužena mezi kuzelem a kolektorem. Při procesu dloužení dochází také k odpaření rozpouštědla.

Jednou z možností je zvlákňování z volné hladiny neboli bez jehlové zvlákňování. Na tomto principu funguje zvlákňovací zařízení zvané nanospider. Zařízení se skládá z válce, který se otáčí ve vaně s polymerním roztokem, čímž je na něj nanášena tenká vrstva tohoto polymerního roztoku. Na této vrstvě dochází k tvorbě velkého množství Taylorových kuželů. Z těchto kuželů se tvoří vlákna, která jsou zachytávána na netkanou textilií tvořící kolektor. Podkladová netkaná textilie je odtahována, čímž dochází ke vzniku nanovláknenné vrstvy, kterou lze z podkladové textilie sejmut. Jako zvlákňovací elektroda nemusí být použit pouze hladký válec, ale mohou být použity různé modifikace, například strunový válec. [8]

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřená na výrobu nanovlákněné vrstvy pomocí elektrostatického zvlákňování roztoku polyamidu 6 na laboratorním zařízení nanospider. Dalším krokem je analýza nově vytvořené nanovlákněné vrstvy z hlediska plošné hmotnosti a průměru vláken. Jsou vytvořeny snímky na elektronovém mikroskopu pro vizuální zhodnocení kvality nanovlákněné vrstvy a určení průměru vláken. Dále je zde testována filtrační účinnost na laboratorní sestavě pro podtlakovou filtraci a následně prověřeny filtrační charakteristiky nově vytvořeného filtru na filtrační trati. Všechny přístroje, potřebné pro měření experimentální části, se nacházejí na půdě Technické univerzity v Liberci.

### 4.1 Nanovlákněná vrstva

V následujících částech této kapitoly je popsána výroba nanovlákněné vrstvy z polymerního roztoku. Jedná se o přípravu polymerních roztoků, podmínky zvlákňování a popis zvlákňovacího zařízení - modifikované zařízení nanospider. Na závěr kapitoly je provedena analýza vyrobených nanovlákněných vrstev z hlediska plošné hmotnosti a průměru vláken.

#### 4.1.1 Polymerní roztoky

Pro výrobu polymerního roztoku, ze kterého bude následně vyrobena nanovlákněná vrstva, je použit polyamid 6, jehož chemický vzorec je  $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}]_n$ .

Polyamid 6 je používán pro výrobu textilních vláken a je to vhodný polymer pro výrobu nanovláken. Jeho nevýhodou je schopnost sorbovat vodu, což ovlivňuje jeho fyzikální vlastnosti. Vzhledem k plánovanému použití pro kapalinovou filtraci to není problém. Jako další polymery byly uvažovány polyuretan (PU) a polyvinylidifluorid (PVDF). Oba polymery mají dobrou chemickou odolnost. Jejich nevýhodou je nutnost použití silně toxických rozpouštědel pro výrobu roztoku. Jedná o dimetylformamid v případě PU a o dimetylacetát v případě PVDF. Z těchto důvodů je zvolen polyamid 6.

Polyamidy jsou lineární polymery v jejichž hlavním řetězci se pravidelně střídají skupiny  $-\text{CO}-\text{NH}-$ , mezi kterými se nacházejí methylové skupiny  $-\text{CH}_2-$ . Vyrábějí se

třemi druhy polymerací – polykondenzace  $\omega$ -aminokarboxylových kyselin, polymerace cyklických aminů nebo polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami.

Nejznámějšími zástupci jsou polyamid 6 (PA 6) a polyamid 6.6 (PA 6.6). Čísla uváděná za názvem označují počet atomů uhlíku v molekule.

Hustota polyamidu 6 je  $1\,120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , teplota tání  $215\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$  a modul pružnosti v tahu je  $1\,300\text{ MPa}$ . [9]

Literatura [10] uvádí jako nejvhodnější rozpouštědlo polyamidu 6 kombinaci 99 % kyseliny octové ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) s 98% kyselinou mravenčí ( $\text{HCOOH}$ ), a to v poměru 2:1 (hmotnostně), kdy koncentrace polymeru v roztoku je udávána v procentech z hmotnosti.

Rozpouštění granulátu probíhá při pokojové teplotě za mechanického míchání do doby, než dojde ke vzniku homogenního polymerního roztoku. Ve většině případů jsou tyto polymerní roztoky připravovány po dobu 24 hodin.

Jedná se o přípravu polymerních roztoků, které budou následně použity pro elektrostatické zvlákňování na zařízení zvaném nanospider.

Výrobce dodaného granulátu polyamidu 6 je firma BASF. Kyselina octová a kyselina mravenčí byly nakoupeny od firmy PENTA s.r.o.

Celkem je připraveno 20 g roztoku polymeru o třech různých koncentracích polymeru v roztoku, a to 8, 10 a 12 % hm. Koncentrace polymerních roztoků jsou zvoleny na základě literatury [10] a zkušeností. Polymerní roztoky jsou připravovány za zvýšené teploty  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a mechanického míchání (200 otáček/min), na magnetické míchačce. Celková doba rozpouštění polymerního granulátu je 24 hodin, čímž je zajištěno dokonalé rozpuštění polymerního granulátu.

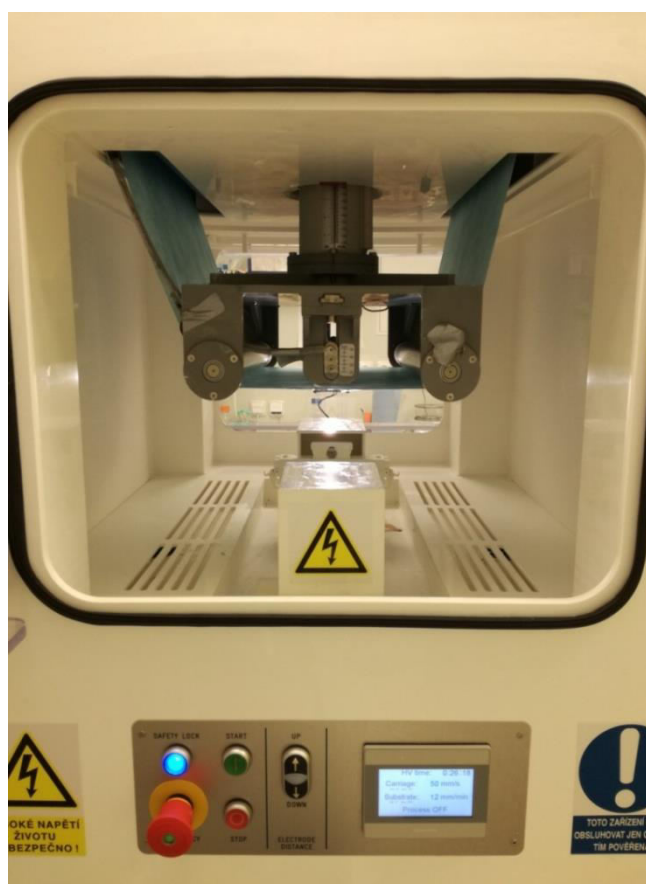
Tabulka 3 zobrazuje dávkování jednotlivých chemikálií pro dané koncentrace, vypočítané pro celkovou hmotnost polymerního roztoku 20 g.

Tabulka 3 - receptury pro přípravu vzorků

| Koncentrace polymeru<br>v roztoku | PA 6       | Kyselina<br>octová | Kyselina<br>mravenčí |
|-----------------------------------|------------|--------------------|----------------------|
| <i>[% hm]</i>                     | <i>[g]</i> | <i>[g]</i>         | <i>[g]</i>           |
| 8                                 | 1,60       | 12,30              | 6,10                 |
| 10                                | 2,00       | 12,00              | 6,00                 |
| 12                                | 2,40       | 11,70              | 5,90                 |

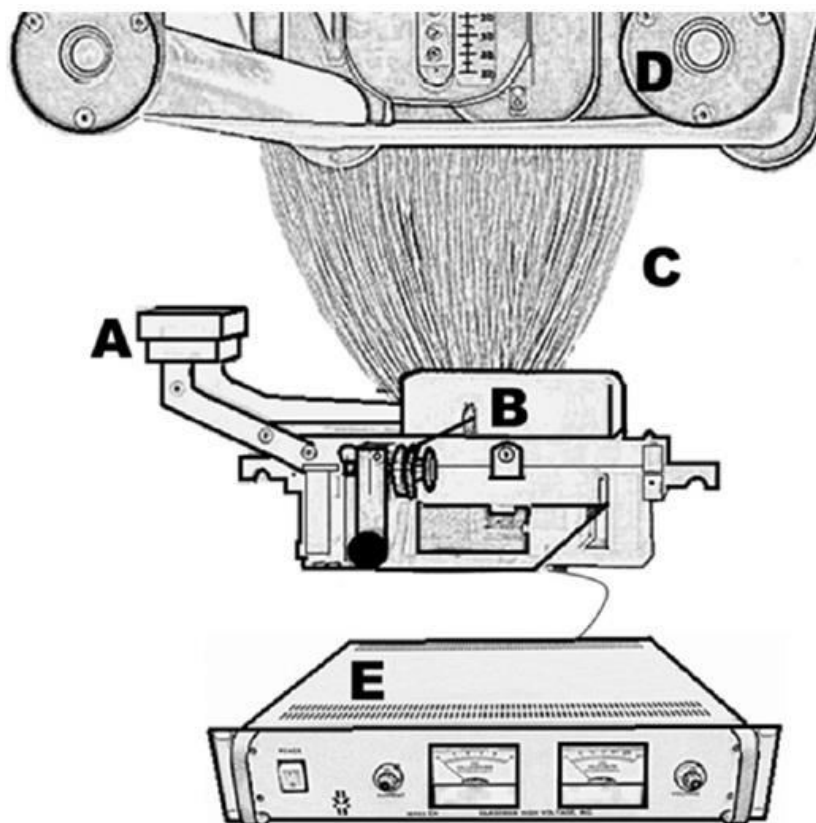
#### 4.1.2 Elektrostatické zvlákňování

Připravené polymerní roztoky jsou zvlákňovány na laboratorním zařízení nanospider, které je ukázáno na obrázku 11. Jedná se o modifikované zařízení, kde je jako zvlákňovací elektroda i kolektor použita struna. Struna sloužící jako zvlákňovací elektroda má průměr 6 mm. Pod kolektorem je na odtahových válečcích podkladová textilie o šířce 500 mm, která se převíjí. Na tuto podkladovou textilií je zachytávána vznikající nanovláknenná vrstva. Rychlost odtahu podkladové textilie je regulovatelná, čímž lze regulovat plošnou hmotnost vznikající nanovláknenné vrstvy. Jako podkladová textilie je použita polypropylenová netkaná textilie typu spunbond.



Obrázek 11 - použité laboratorní zařízení nanospider

Na obrázku 12 je schéma tohoto modifikovaného typu zvlákňovacího zařízení. Dávkovací zařízení s roztokem (A) dávkuje polymerní roztok na zvlákňovací elektrodu (B). Pomocí zdroje vysokého napětí (E) vzniká elektricky nabitý roztok, který je zvlákňován (C). Vznikající vlákna jsou zachytávána na podkladovou textilií, která je odtahována pomocí odtahových válečků (D).

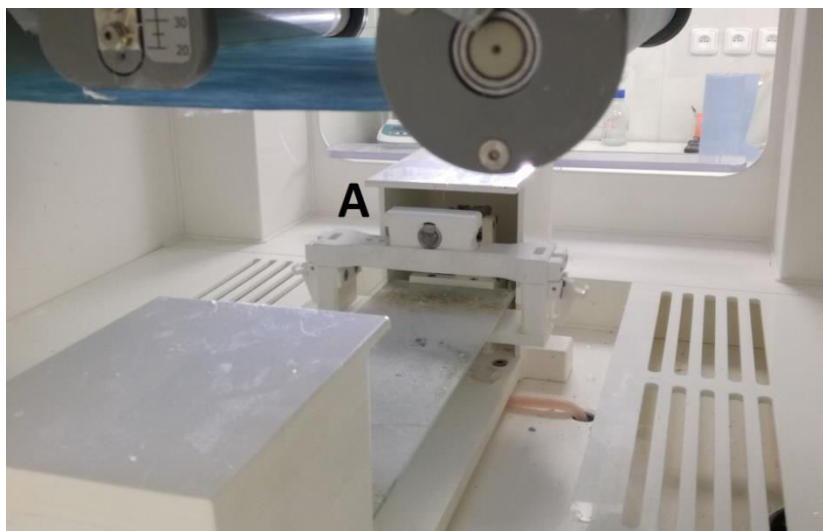


Obrázek 12 - schéma nanospideru [10]

Oproti grafickému znázornění, které je na obrázku výše, se použité laboratorní zařízení liší v umístění dávkovacího zařízení (A), viz obrázek 13.

Dávkovací zařízení obsahuje nádobku, do které se aplikuje připravený polymerní roztok. Po spuštění nanospideru se dávkovač pohybuje po zvlákňovací elektrodě tam a zpět, čímž dávkuje potřebné množství polymerního roztoku na zvlákňovací elektrodu. Rychlost pohybu dávkovacího zařízení je regulovatelná.





Obrázek 13 - detail použitého laboratorního zařízení

Podmínky při zvlákňování jsou pro všechny polymerní roztoky shodné a jsou zobrazeny v tabulce 4. Navíc jsou nanovláknenné vrstvy z polymerních roztoků o koncentracích 10 a 12 % vytvořeny ve čtyřech různých plošných hmotnostech. U koncentrace 8 % je vytvořena pouze plošná hmotnost odpovídající rychlosti odtahu  $45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , jenž je vytvářena jako první. Důvodem je špatné zvlákňování a tvorba defektů. Plošnou hmotnost lze regulovat pomocí změny rychlosti odtahu podkladové textilie.

Tabulka 4 - podmínky zvlákňování

|                            |                                     |                |
|----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Rychlost dávkovače         | $[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$   | 50             |
| Napětí (kladná elektroda)  | $[\text{kV}]$                       | 70             |
| Napětí (záporná elektroda) | $[\text{kV}]$                       | 10             |
| Vzdálenost kolektoru       | $[\text{mm}]$                       | 160            |
| Rychlost odtahu substrátu  | $[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ | 12; 23; 45; 68 |

#### 4.1.3 Analýza nanovláknenných vrstev

Nanovláknenné vrstvy jsou analyzovány z hlediska jejich plošné hmotnosti a průměrů vláken.

##### a) Plošná hmotnost

Plošná hmotnost nanovláknenných vrstev je zjišťována pomocí vážení na analytických vahách.

Jsou váženy vždy tři vzorky o rozměrech  $50 \times 50 \text{ mm}$  a zjištěná plošná hmotnost je následně přepočítána na jeden metr čtvereční.

Tabulka 5 zobrazuje hmotnosti jednotlivých vzorků.

Tabulka 5 - hmotnosti vzorků o rozměru 5×5 cm

| Rozměr 50x50 mm |                         | Číslo vážení |        |        |
|-----------------|-------------------------|--------------|--------|--------|
| Koncentrace     | Rychlost                | 1            | 2      | 3      |
| [%]             | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [g]          | [g]    | [g]    |
| 8               | 45                      | 0,0030       | 0,0028 | 0,0031 |
| 10              | 12                      | 0,0093       | 0,0092 | 0,0093 |
|                 | 23                      | 0,0050       | 0,0057 | 0,0054 |
|                 | 45                      | 0,0024       | 0,0025 | 0,0021 |
|                 | 68                      | 0,0012       | 0,0017 | 0,0015 |
| 12              | 12                      | 0,0102       | 0,0093 | 0,0098 |
|                 | 23                      | 0,0041       | 0,0048 | 0,0043 |
|                 | 45                      | 0,0038       | 0,0027 | 0,0031 |
|                 | 68                      | 0,0019       | 0,0020 | 0,0022 |

Hmotnosti přepočtené na jeden metr čtvereční jsou uvedeny v tabulce 6. Jelikož se jedná o střední hodnoty je zde uvedena také směrodatná odchylka a 95% interval spolehlivosti. Z důvodu zvlášť malého výběru je pro výpočet intervalu spolehlivosti použit vzorec:

$$95\% IS = \bar{x} \pm T_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

kde  $\bar{x}$  je střední hodnota,  $T_{\alpha}$  je kvantil normálního rozdělení a  $s$  je směrodatná odchylka.

Kvantil normálního rozdělení pro malé výběry, pro  $n = 3$ , je roven hodnotě 4,3.

Tabulka 6 - přepočítané plošné hmotnosti na jeden metr čtvereční

| PLOŠNÁ HMOTNOST [g.m <sup>-2</sup> ] |                         |                 |                     |                        |           |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| Koncentrace                          | Rychlost odtahu         | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           |
| [%]                                  | [mm.min <sup>-1</sup> ] | $\bar{x}$       | $s$                 | Dolní mez              | Horní mez |
| 8                                    | 45                      | 1,1867          | 0,0499              | 1,0628                 | 1,3105    |
| 10                                   | 12                      | 3,7067          | 0,0189              | 3,6599                 | 3,7535    |
|                                      | 23                      | 2,1467          | 0,1147              | 1,8619                 | 2,4314    |
|                                      | 45                      | 0,9333          | 0,0680              | 0,7645                 | 1,1021    |
|                                      | 68                      | 0,5867          | 0,0822              | 0,3826                 | 0,7907    |
| 12                                   | 12                      | 3,9067          | 0,1473              | 3,5410                 | 4,2723    |
|                                      | 23                      | 1,7600          | 0,1178              | 1,4677                 | 2,0523    |
|                                      | 45                      | 1,2800          | 0,1818              | 0,8286                 | 1,7314    |
|                                      | 68                      | 0,8133          | 0,0499              | 0,6895                 | 0,9372    |

### b) Průměry vláken

Vzniklé nanovlákněné vrstvy jsou nasnímány pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu VEGA3 Tescan. Snímky jsou pořizovány v několika zvětšeních pro určení průměru vláken a zhodnocení kvality povrchu vyrobené vrstvy.

Nanovlákněné vrstvy jsou analyzovány také z hlediska průměru vláken. Pro analýzu průměrů jsou použity snímky vytvořené v padesáti tisíci násobném zvětšení.

Průměry vláken jsou měřeny pomocí softwaru ImageJ. Nejdříve je nutné kalibrovat rozměr jednoho pixelu dle měřítka, které je zobrazeno na každém snímku. Následuje naměření celkem 50 průměrů vláken na každém snímku.

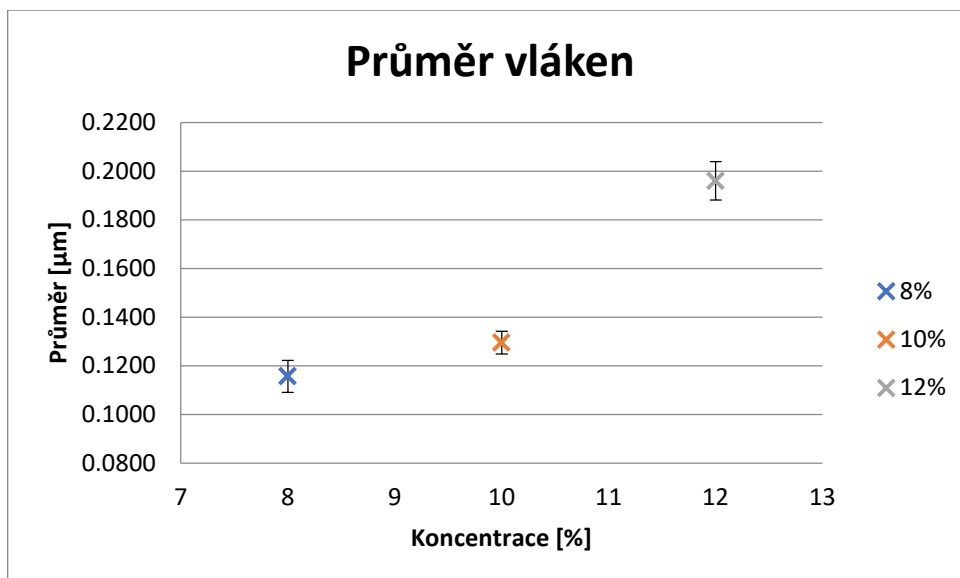
Jelikož rychlost odtahu podkladové textilie nemá vliv na průměr vláken, ale pouze na plošnou hmotnost nanovlákněné vrstvy, jsou naměřená data sloučena dohromady.

To znamená, že pro koncentraci polymerního roztoku 8 % bylo použito celkem 50 dat, jelikož byla vytvořena nanovlákněná vrstva pouze v jedné plošné hmotnosti. Pro koncentraci polymerního roztoku 10 % a 12 % je použito celkem 200 dat, jelikož byla sloučena měření z jednotlivých vrstev, které se lišily právě v plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy. Získaná data jsou následně statisticky zpracována.

Tabulka 7 zobrazuje střední hodnoty průměrů vláken při jednotlivých koncentracích doplněné o směrodatné odchylky a 95% intervaly spolehlivosti. Na obrázku 14 je graf, ve kterém jsou hodnoty z tabulky zobrazeny graficky.

Tabulka 7 - střední hodnoty průměrů vláken s intervaly spolehlivosti

| PRŮMĚR VLÁKEN [ $\mu\text{m}$ ] |                 |                     |                        |           |
|---------------------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| Koncentrace                     | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           |
| [%]                             | $\bar{x}$       | $s$                 | Dolní mez              | Horní mez |
| 8                               | 0,1156          | 0,0239              | 0,1090                 | 1,1222    |
| 10                              | 0,1295          | 0,0334              | 0,1248                 | 0,1341    |
| 12                              | 0,1960          | 0,0570              | 0,1881                 | 0,2039    |

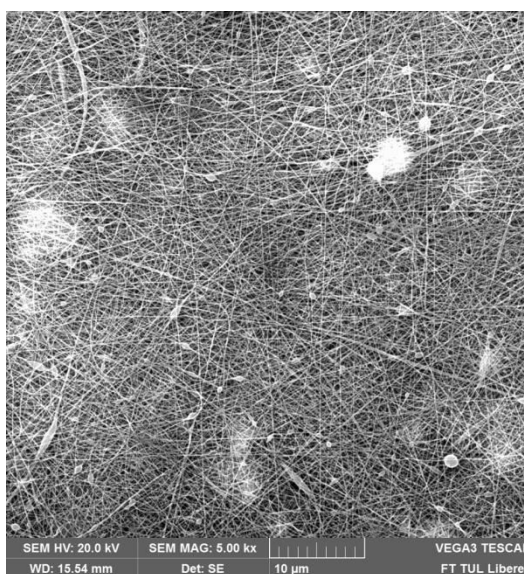


Obrázek 14 - střední hodnoty průměrů vláken s intervaly spolehlivosti

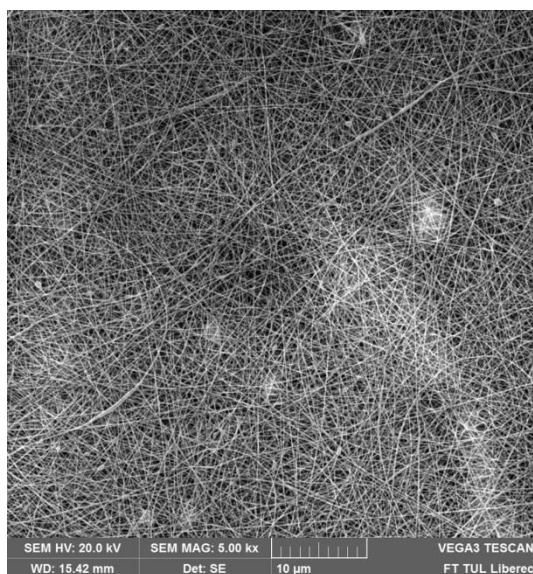
Z hodnot uvedených v tabulce výše a následného grafického zobrazení je patrné, že se zvyšující se koncentrací roztoku polymeru roste také průměr vznikajících nanovláken.

Z vypočítaných dat je dále patrné, že průměry vláken u všech koncentrací se pohybují ve stovkách nanometrů a proto lze tato vlákna považovat za nanovlákná.

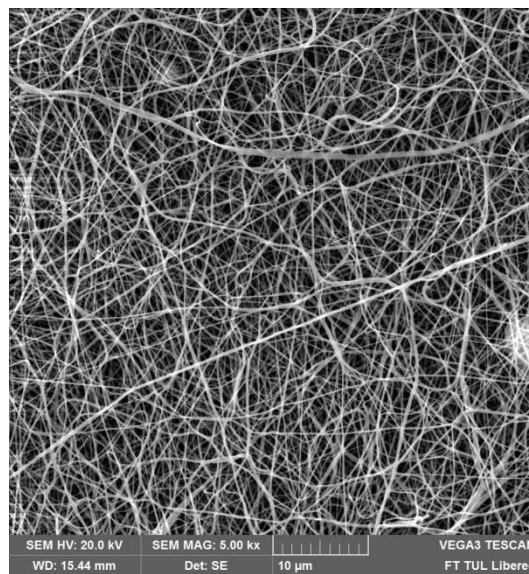
Nanovláknenná vrstva vyrobená osmiprocentního roztoku byla z dalšího zpracování vyloučena, i přes to, že vyrobená vlákna jsou v nano rozměrech. Důvodem pro vyloučení této vrstvy je fakt, že při její výrobě docházelo k velkému množství defektů (kapek), jak lze vidět na snímku z mikroskopu, obrázek 15. Pro porovnání jsou zde, na obrázcích 16 a 17, snímky ostatních vrstev.



Obrázek 15 - nanovláknenná vrstva; 8% koncentrace; 5 000× zvětšení



Obrázek 16 - nanovláknenná vrstva; 10% koncentrace; 5 000× zvětšení



Obrázek 17 - nanovláknenná vrstva; 12% koncentrace; 5 000× zvětšení

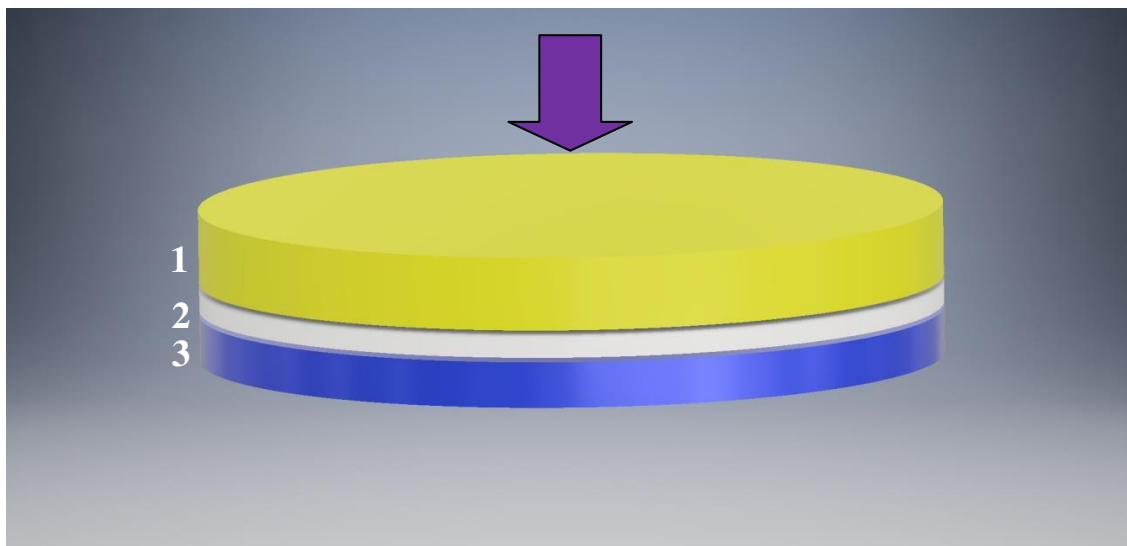
## 4.2 Konstrukce výsledného filtru

Vytvořená nanovláknenná vrstva je nanesena na netkané textilii, jenž slouží jako podklad při její výrobě. Ve všech případech se jedná o polypropylenovou netkanou textilií typu spunbond.

Jelikož podkladová textilie zajišťuje dostatečnou pevnost nanovláknenné vrstvy při její manipulaci, bude také součástí konstrukce výsledného filtru. Dalším důvodem pro její použití je nízká mechanická odolnost nanovláknenné vrstvy, kdy by mohlo dojít k jejímu poškození vlivem tlaku proudící kapaliny.

Konstrukce výsledného filtru je tedy následující - podkladová netkaná textilie typu spunbond, nanovláknenná vrstva, netkaný filtr. Konstrukce výsledného filtru je schematicky zobrazena na obrázku 18.

Toto uspořádání vychází z předpokladu, že netkaný filtr, který má větší rozměry pórů, zachytí hrubé nečistoty. Tyto nečistoty by mohly poškodit nanovláknennou vrstvu, případně by mohlo docházet k jejímu rychlejšímu zanesení a tím nižší životnosti filtru. Zároveň nanovláknenná vrstva zachytává částice, které netkaný filtr, vzhledem k jejich velikosti, není schopen zachytit.



Obrázek 18 - konstrukce výsledného filtru (1 - netkaný filtr; 2 - nanovláknenná vrstva; 3 - podkladová textilie typu spunbond); šipka znázorňuje směr proudění kapaliny

### 4.3 Ověřování filtračních vlastností

Předcházející kapitola popisuje výrobu nanovláknenné vrstvy pomocí elektrostatického zvlákňování. Dále je provedena analýza vyrobených nanovláknenných vrstev a to z hlediska plošné hmotnosti a průměru vláken.

Tato kapitola je věnována testování filtračních charakteristik nově vytvořeného filtru. Je testována filtrační účinnost na laboratorní sestavě pro podtlakovou filtraci. Dle výsledků filtrační účinnosti je vybrána nanovláknenná vrstva, která bude následně použita pro další testování. Dále se kapitola zabývá aplikací vybrané nanovláknenné vrstvy na vnější stranu rukávového filtru pro možnost testování na filtrační trati a výběrem vhodné varianty. Tento výsledný filtr je následně testován z hlediska tlaku, tlakového spádu a průtoku na filtrační trati.

V tabulce 8 jsou shrnuty parametry vyrobených nanovláknenných vrstev - koncentrace roztoku, rychlost odtahu, plošná hmotnost, průměr vláken a použité označení. Použité označení je kombinací koncentrace roztoku (první hodnota) a rychlosti odtahu podkladového substrátu (druhá hodnota). Podkladový substrát tvořila netkaná textilie typu spunbond.



Tabulka 8 - parametry vyrobených nanovlákných vrstev

| Koncentrace | Rychlost odtahu         | Plošná hmotnost      | Průměr vláken | Označení |
|-------------|-------------------------|----------------------|---------------|----------|
| [%]         | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [g.m <sup>-2</sup> ] | [nm]          | -        |
| 10          | 12                      | 3,71                 | 129,45        | 10-12    |
|             | 23                      | 2,15                 |               | 10-23    |
|             | 45                      | 0,93                 |               | 10-45    |
|             | 68                      | 0,59                 |               | 10-68    |
| 12          | 12                      | 3,91                 | 195,99        | 12-12    |
|             | 23                      | 1,76                 |               | 12-23    |
|             | 45                      | 1,28                 |               | 12-45    |
|             | 68                      | 0,81                 |               | 12-68    |

Jednotlivé kombinace nanovlákných vrstev s originálními filtry jsou uvedeny v tabulce 9. Názvy těchto kombinací jsou složeny z označení originálního filtru a označení nanovlákné vrstvy. Jelikož jsou nanovlákné vrstvy nanoseny na podkladové textilii typu spunbond objevuje se v názvu výsledného filtru i tato textilie označena zkratkou SB.

Například výsledný filtr s označením PP50\_SB\_NANO10-45 se skládá z originálního filtru PP50 v kombinaci s nanovláknou vrstvou vyrobenou z 10% roztoku při odtahové rychlosti 45 mm.min<sup>-1</sup> nanosené na podkladové textilii typu spunbond.

Tabulka 9 - označení jednotlivých kombinací

|                |                    |                    |                    |                    |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Výsledný filtr | PP25_SB_NANO 10-12 | PP25_SB_NANO 10-23 | PP25_SB_NANO 10-45 | PP25_SB_NANO 10-68 |
| Nanovrstva     | 10-12              | 10-23              | 10-45              | 10-68              |
| Výchozí filtr  | PP 25              | PP 25              | PP 25              | PP 25              |
| Výsledný filtr | PP50_SB_NANO 10-12 | PP50_SB_NANO 10-23 | PP50_SB_NANO 10-45 | PP50_SB_NANO 10-68 |
| Nanovrstva     | 10-12              | 10-23              | 10-45              | 10-68              |
| Výchozí filtr  | PP 50              | PP 50              | PP 50              | PP 50              |
| Výsledný filtr | PP25_SB_NANO 12-12 | PP25_SB_NANO 12-23 | PP25_SB_NANO 12-45 | PP25_SB_NANO 12-68 |
| Nanovrstva     | 12-12              | 12-23              | 12-45              | 12-68              |
| Výchozí filtr  | PP 25              | PP 25              | PP 25              | PP 25              |
| Výsledný filtr | PP50_SB_NANO 12-12 | PP50_SB_NANO 12-23 | PP50_SB_NANO 12-45 | PP50_SB_NANO 12-68 |
| Nanovrstva     | 12-12              | 12-23              | 12-45              | 12-68              |
| Výchozí filtr  | PP 50              | PP 50              | PP 50              | PP 50              |

#### 4.3.1 Stanovení filtrační účinnosti

Filtrační trať umožňuje sledovat pouze charakteristiky týkající se tlaku a průtoku. Pro zjištění účinnosti vytvořených filtrů je nutné použít jiné laboratorní zařízení.

Laboratorní zařízení je zobrazeno na obrázku 19. Slouží k filtrování kapaliny za pomoci podtlaku. Umožňuje testování vzorků o průměru 47 mm. Skládá se z filtračního nástavce, do kterého se vkládají vzorky a také umožňuje připojení k vývěvě, nálevky o objemu 500 ml a sběrné láhve o objemu 1 000 ml.

Vzorek je umístěn do filtračního nástavce a pomocí nálevky, ve které se nachází těsnící kroužek, utěsněn. Celá filtrační sestava je takto kompletní. K filtračnímu nástavci je dále připojena vývěva, která vytváří podtlak, a druhý otevřený konec nástavce je utěsněn.



Obrázek 19 - laboratorní sestava pro podtlakovou filtraci

Postup sestavení filtrační sestavy s vloženým vzorkem filtru je na obrázku 20.



Obrázek 20 - postup sestavení filtrační sestavy (vlevo - filtrační nástavec upevněný na sběrné láhvi, uprostřed - vložený nosič filtru s těsněním pro umístění testovaného filtru, vpravo - kompletní sestava s vloženým vzorkem)



Filtrační účinnost je určována na základě průniku částic přes filtr. Jedná se o doplněk k průniku, tedy součet těchto dvou hodnot se rovná 1, příp. 100 %. Průnik je zjišťován pomocí poměru zákalu přefiltrované kapaliny a kapaliny kontaminované. Výsledná hodnota filtrační účinnosti je převedena na procenta.

Zákal byl měřen na zařízení Turbidimetr TB 300 IR, které je zobrazeno na obrázku 21. Jedná se o optické měřicí zařízení, které měří zákal na základě rozptylu světla, kdy je procházející světlo pohlcováno a zároveň rozptylováno. Výsledný stupeň zákalu je ovlivněn velikostí a



Obrázek 21 - Turbidimetr TB 300 IR [11]

tvarem pevných částic obsažených v kapalině. Jednotkou zákalu je NTU - Nephelometric Turbidity Units. Měření probíhá tak, že se do kyvety (nádoba o objemu 15 ml pro měření optických vlastností kapalin) nalije testovaná kapalina a následně se vloží do zařízení, které určí míru zákalu. Kyvetu je nutno před vložením do zařízení pečlivě očistit, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků nečistotami usazenými na vnějších stranách kyvety.

Pro potřeby měření byla kontaminována kapalina, která vznikla přidáním 10  $\mu$ l disperze polystyrenových částic o velikosti 0,5  $\mu$ m do 500 ml destilované vody. Polystyrenové částice se pro lepší aplikaci nachází také v kapalině a celkem tvoří 10 % objemu, to znamená, že byl přidán celkem 1  $\mu$ l částic. Takto bylo připraveno celkem šest dávek kontaminované vody. Hodnoty zákalu kontaminované vody jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 - hodnoty zákalu kontaminované vody

| Zákal | [NTU] | 18,00 | 22,40 | 27,80 | 24,00 | 19,3 | 18,9 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|

Před začátkem měření bylo nutno omýt všechny používané komponenty v destilované vodě pro minimalizaci kontaminace okolními nečistotami. Toto omývání bylo prováděno také mezi jednotlivými filtračními testy, aby nedocházelo ke kontaminaci nových vzorků.

Pro odstranění možnosti kontaminace vzorků možnými nečistotami obsažených v destilované vodě a možných mikro vrypů na kyvetě bylo provedeno měření zákalu destilované vody s hodnotou 0,29 NTU. Tato hodnota byla následně odečtena od všech naměřených hodnot zákalu jak pro přefiltrovanou vodu tak i pro vodu kontaminovanou.

*Postup měření na laboratorní sestavě, viz obrázek 19:*

- kompletace filtrační sestavy s požadovaným filtrem
- provedení filtrace kontaminované vody
- odlití přefiltrované vody ze sběrné lahve do kyvety a očištění kyvety
- měření zákalu přefiltrované vody
- omytí komponent v destilované vodě

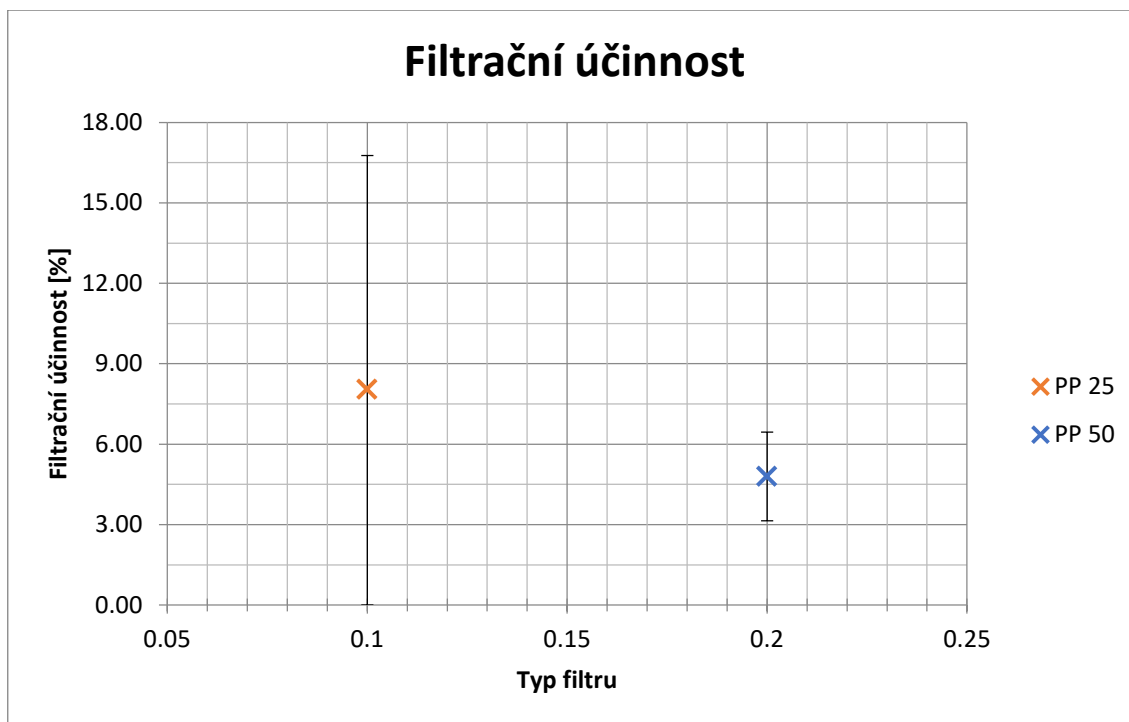
Pro každé měření byly provedeny tři opakování a ze zjištěných hodnot vypočítána filtrační účinnost. Hodnoty účinnosti jsou dále statisticky zpracovány. Je vypočtena střední hodnota, směrodatná odchylka a 95% interval spolehlivosti pro střední hodnotu. Interval spolehlivosti je vypočítán dle vzorce pro zvláště malé výběry, viz rovnice 14.

#### *a) výchozí filtr*

Nejdříve byla naměřena filtrační účinnost samostatných netkaných textilií. Střední hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11 a graficky znázorněny na obrázku 22. Dle očekávání bylo dosaženo vyšší filtrační účinnosti u netkané textilie s menší velikostí průměru póru.

*Tabulka 11 - průměrná filtrační účinnost pro samostatné základní filtry*

| FILTRAČNÍ ÚČINNOST [%] |                 |                     |                        |           |
|------------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| Označení               | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           |
| -                      | $\bar{x}$       | s                   | Dolní mez              | Horní mez |
| PP 25                  | 8,05            | 3,51                | 0                      | 16,77     |
| PP 50                  | 4,80            | 0,66                | 3,15                   | 6,44      |



Obrázek 22 - filtrační účinnost výchozích netkaných filtrů

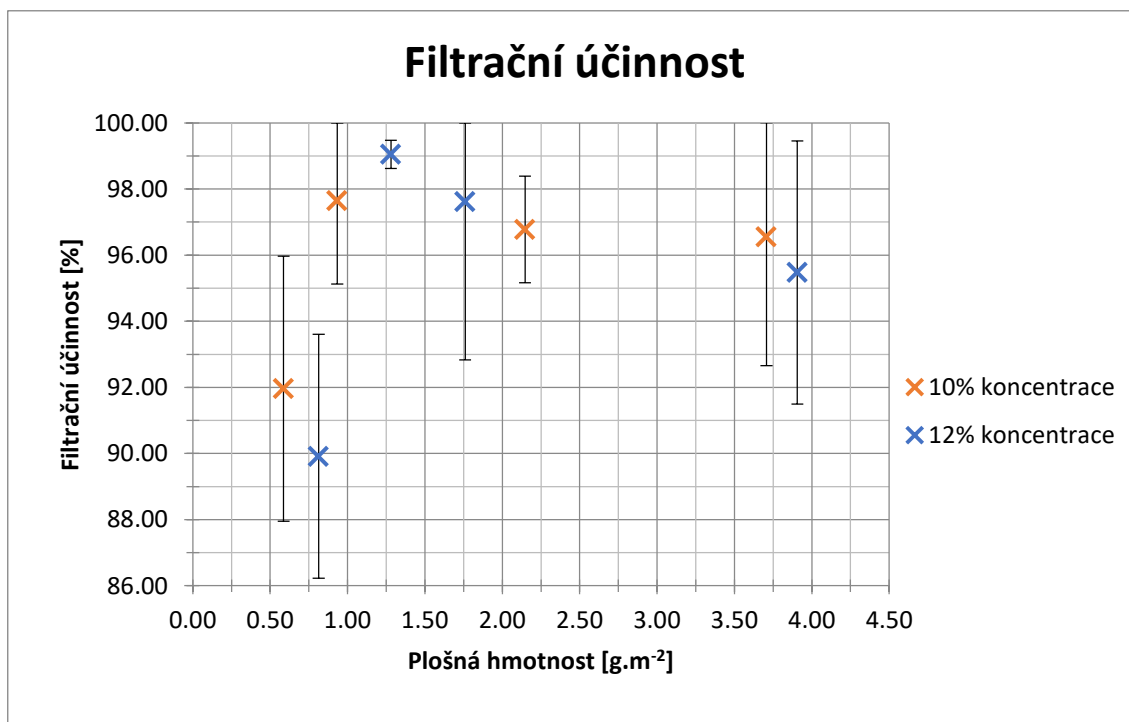
*b) nanovláknenné vrstvy na podkladové textilii*

V tabulce 12 jsou střední hodnoty filtrační účinnosti samostatných nanovláknenných vrstev. Filtrační účinnost je zde velmi vysoká, téměř ve všech případech se pohybuje nad hodnotou 90 %.

Tabulka 12 - průměrná filtrační účinnost nanovláknenných vrstev na podkladové textilii

| FILTRAČNÍ ÚČINNOST [%] |                 |                 |                     |                        |           |
|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| Označení               | Plošná hmotnost | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           |
| -                      | $[g.m^{-2}]$    | $\bar{x}$       | s                   | Dolní mez              | Horní mez |
| 10-12                  | 3,71            | 96,55           | 1,57                | 92,66                  | 100,00    |
| 10-23                  | 2,15            | 96,78           | 0,65                | 95,17                  | 98,39     |
| 10-45                  | 0,93            | 97,65           | 1,02                | 95,13                  | 100,00    |
| 10-68                  | 0,59            | 91,96           | 1,62                | 87,95                  | 95,97     |
| 12-12                  | 3,91            | 95,47           | 1,60                | 91,49                  | 99,46     |
| 12-23                  | 1,76            | 97,62           | 1,93                | 92,83                  | 100,00    |
| 12-45                  | 1,28            | 99,05           | 0,17                | 98,62                  | 99,48     |
| 12-68                  | 0,81            | 89,92           | 1,49                | 86,23                  | 93,60     |

Na obrázku 23 jsou tyto hodnoty zobrazeny graficky. Můžeme vidět, že nejvyšší filtrační účinnosti bylo dosaženo při rychlosti odtahu  $45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , což platí pro obě koncentrace roztoků. Naopak nejnižší účinnosti bylo dosaženo při rychlosti  $68 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  kdy vznikala vrstva s nejvyšší plošnou hmotností. U této rychlosti nejspíše docházelo k rychlému zanesení vrstvy a jejímu následnému poškození, čímž se filtrační účinnost snížila.



Obrázek 23 - filtrační účinnost nanovlákněných vrstev na podkladové textilii

### c) výsledný filtr

Tabulka 13 obsahuje střední hodnoty filtrační účinnosti pro jednotlivé plošné hmotnosti u obou koncentrací za použití polypropylenového netkaného filtru s velikostí průměru pórů  $25 \mu\text{m}$  (PP25) a tabulka 14 hodnoty při použití netkaného filtru s póry o průměru  $50 \mu\text{m}$  (PP50).

Tabulka 13 - průměrná filtrační účinnost při použití výchozího filtru PP 25

| FILTRAČNÍ ÚČINNOST [%] |                 |                 |                     |                        |           |
|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| Označení               | Plošná hmotnost | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           |
| -                      | $[g.m^{-2}]$    | $\bar{x}$       | s                   | Dolní mez              | Horní mez |
| PP25_SB_NANO10-12      | 3,71            | 89,51           | 2,05                | 84,42                  | 94,59     |
| PP25_SB_NANO10-23      | 2,15            | 95,17           | 2,90                | 87,96                  | 100,00    |
| PP25_SB_NANO10-45      | 0,93            | 97,68           | 0,81                | 95,66                  | 99,70     |
| PP25_SB_NANO10-68      | 0,59            | 91,21           | 3,14                | 83,41                  | 99,02     |
| PP25_SB_NANO12-12      | 3,91            | 92,08           | 1,46                | 88,46                  | 95,70     |
| PP25_SB_NANO12-23      | 1,76            | 94,50           | 0,54                | 93,16                  | 95,83     |
| PP25_SB_NANO12-45      | 1,28            | 96,28           | 1,47                | 92,64                  | 99,91     |
| PP25_SB_NANO12-68      | 0,81            | 91,72           | 1,63                | 87,67                  | 95,77     |

Tabulka 14 - průměrná filtrační účinnost při použití výchozího filtru PP 50

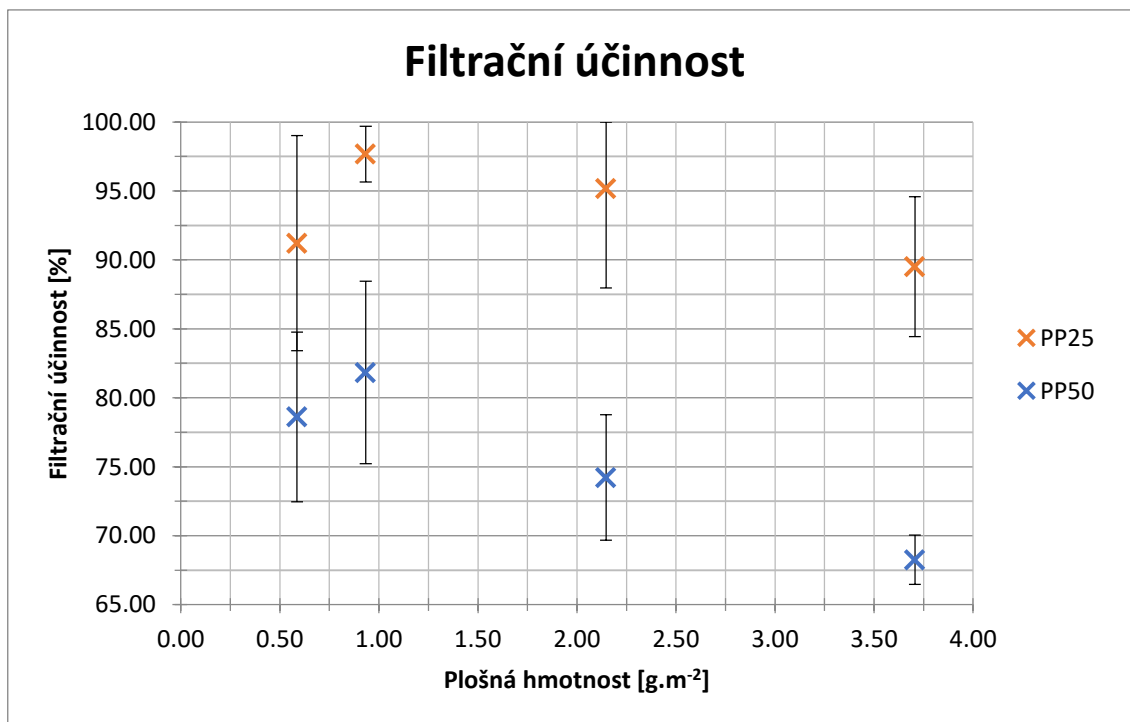
| FILTRAČNÍ ÚČINNOST [%] |                 |                 |                     |                        |           |
|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|
| Označení               | Plošná hmotnost | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           |
| -                      | $[g.m^{-2}]$    | $\bar{x}$       | s                   | Dolní mez              | Horní mez |
| PP50_SB_NANO10-12      | 3,71            | 68,26           | 0,72                | 66,48                  | 70,03     |
| PP50_SB_NANO10-23      | 2,15            | 74,22           | 1,83                | 69,66                  | 78,77     |
| PP50_SB_NANO10-45      | 0,93            | 81,84           | 2,67                | 75,22                  | 88,46     |
| PP50_SB_NANO10-68      | 0,59            | 78,62           | 2,48                | 72,46                  | 84,77     |
| PP50_SB_NANO12-12      | 3,91            | 67,93           | 3,40                | 59,50                  | 76,37     |
| PP50_SB_NANO12-23      | 1,76            | 75,38           | 1,72                | 71,11                  | 79,65     |
| PP50_SB_NANO12-45      | 1,28            | 86,69           | 0,76                | 84,80                  | 88,58     |
| PP50_SB_NANO12-68      | 0,81            | 75,14           | 1,94                | 70,31                  | 79,96     |

Na obrázcích 24 a 25 je graficky znázorněna závislost filtrační účinnosti na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy pro oba typy použitého výchozího filtru, kde číselná hodnota udává průměr pórů základního filtru v mikrometrech.

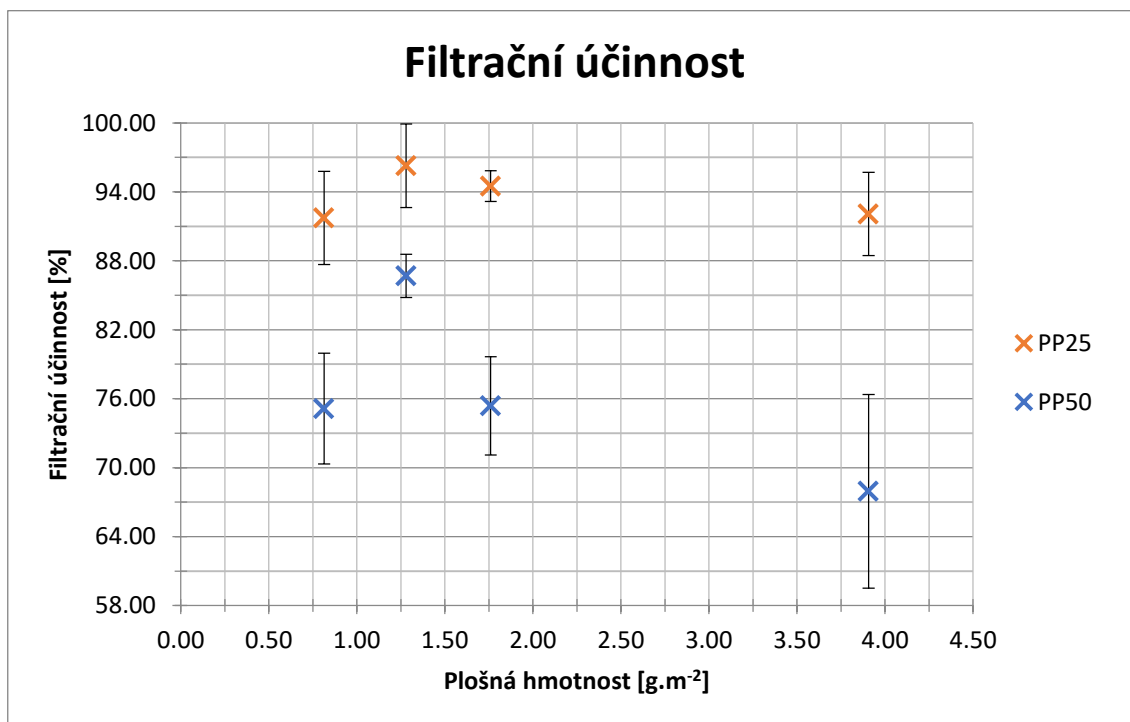
Pro obě koncentrace platí, že filtrační účinnost klesá při použití netkaného filtru s póry o větším průměru. To je nejspíše způsobeno rychlejším ucpáním nanovlákněné vrstvy nečistotami, které se nezachytily na hrubém filtru a po zbytek filtrace již dochází k protlačování částic skrz nanovlákněnou vrstvu případně k jejímu poškození.

Měření ukázalo, že filtrační účinnost nejprve roste s rostoucí plošnou hmotností nanovlákněné vrstvy, ale poté dochází k jejímu poklesu. Nejvyšší filtrační účinnosti

bylo dosaženo u plošné hmotnosti, která odpovídá rychlosti odtahu  $45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , což platí pro obě koncentrace roztoků.



Obrázek 24 - filtrační účinnost výsledných filtrů v kombinaci s nanovrstvou vyrobenou z 10% roztoku



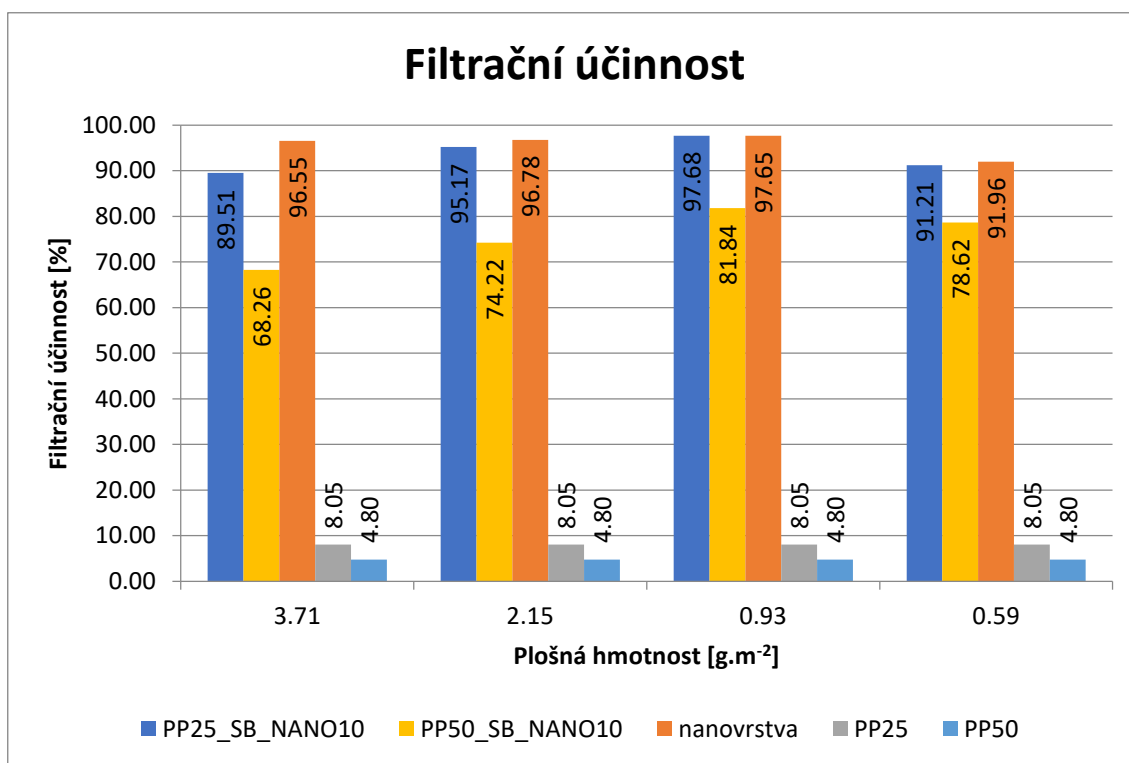
Obrázek 25 - filtrační účinnost výsledných filtrů v kombinaci s nanovrstvou vyrobenou z 12% roztoku

#### d) shrnutí

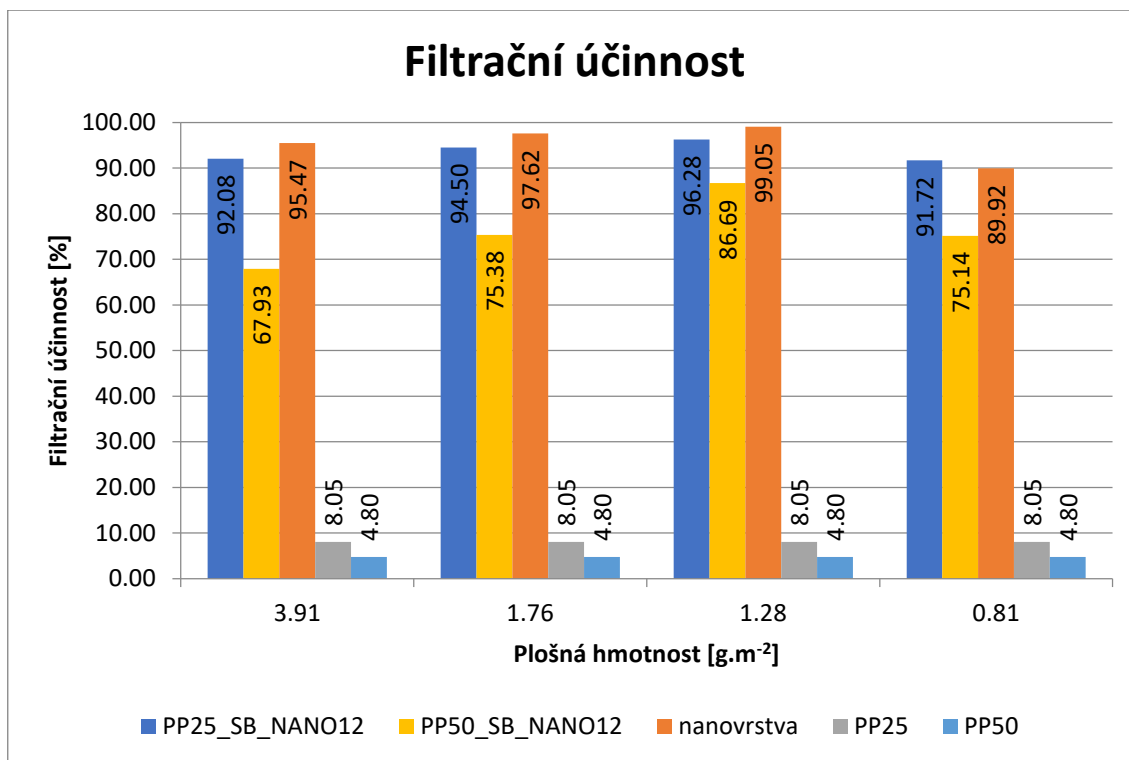
Všechna získaná data týkající se průměrné filtrační účinnosti jsou zaznamenána do sloupcových grafů, obrázek 26 a 27. Pro obě použité koncentrace roztoku byl vytvořen samostatný graf. V grafu je zobrazena průměrná filtrační účinnost výchozího netkaného filtru, nanovlákněné vrstvy a kombinace výchozího filtru s nanovlákněnou vrstvou v závislosti na plošné hmotnosti..

Nejvyšší filtrační účinnosti se dosahovalo při použití nanovlákněné vrstvy vyrobené s rychlostí odtahu  $45 \text{ mm.min}^{-1}$ , a to jak při použití ve výsledném filtru, tak při použití samostatné vrstvy. V kombinaci s výchozím filtrem se nejvyšší účinnosti dosahovalo při použití výchozího filtru s označením PP25. Samostatná nanovlákněná vrstva má vyšší účinnost než v kombinaci s výchozím filtrem, tzn., že se zde neprojevuje synergický efekt.

Synergický efekt znamená, že výsledné vlastnosti kombinací materiálu jsou lepší, než které získáme při pouhém sečtení vlastností jednotlivých materiálů. To zde ovšem neplatí.



Obrázek 26 - filtračních účinností; koncentrace roztoku 10%



Obrázek 27 - filtrační účinnost, koncentrace roztoku 12%

Ze získaných výsledků filtrační účinnosti byla pro další testování vybrána nanovláknenná vrstva vyrobená z roztoku o koncentraci 12 %, vznikající při rychlosti odtahu podkladové textilie 45 mm.min<sup>-1</sup>. Tato vrstva dosahovala nejvyšší filtrační účinnosti, a to jak při použití samostatné vrstvy, tak i při použití ve výsledném filtru v kombinaci s výchozím filtrem označeným PP25 i PP50. Jedná se o vrstvu s označením 12-45 a výsledné filtry s označením PP25\_SB\_NANO12-45 a PP50\_SB\_NANO12-45.

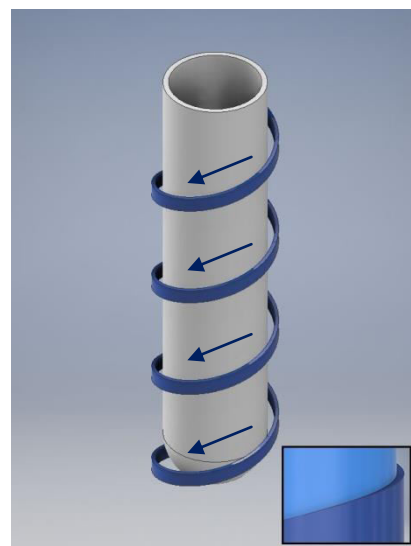


#### 4.3.2 Možnosti aplikace nanovláknenné vrstvy - tvorba výsledného filtru

Konstrukce výsledného filtru udává, že nejdříve má dojít k filtraci přes výchozí netkaný filtr a následně přes nanovláknennou vrstvu. Proudění kapaliny ve filtrační nádobě je zvnitřku ven. Z tohoto důvodu bylo nutno nanovláknennou vrstvu aplikovat z vnější strany rukávcového filtru. Zde je popsáno několik možností, jak nanovláknennou vrstvu aplikovat z vnější strany základního filtru. Pro zkoušení byl použit samostatný spunbond se shodnými vlastnostmi jako spunbond, který sloužil jako podkladová textilie při výrobě nanovláknenné vrstvy. Na obrázcích 28 - 32 jsou pro vizualizaci schematicky zobrazeny jednotlivé možnosti aplikací.

##### *Varianta 1 - šroubovice*

Ovinutí výchozího filtru nanovláknennou vrstvou, nanesené na podkladové textilií, směrem odshora. Při ovíjení dochází k překrytí předchozí otáčky následující otáčkou. V tomto místě dochází k vrstvení, které není žádoucí. Protože spodní část základního filtru je oblá je ukončení ovinutí náročné a dochází k odrytí výchozího filtru. Při zkušebním vložení do filtračního koše došlo k poškození vinutí. Obrázek 28 ilustruje způsob a směr ovíjení výchozího filtru a detail překrytí.



Obrázek 28 - varianta 1

##### *Varianta 2 - šroubovice*

Jedná se modifikaci předchozí varianty, kdy byl pouze změněn směr vinutí. Nyní je vinutí prováděno od spodní části filtru. Docházelo ke stejným problémům jako u předchozí varianty. Docházelo k vrstvení a bylo složité zajistit zakrytí spodní části výchozího filtru. I zde došlo k poškození vinutí při vkládání do filtračního koše. Obrázek 29 ilustruje způsob a směr ovíjení výchozího filtru a detail



Obrázek 29 - varianta 2

překrytí.

#### *Varianta 3 - pás*

U této varianty je použit pás o šíři podkladové textilie, který je po obvodu tvaru výchozího filtru spojen sešitím. Výhodou této varianty je fakt, že nedochází k žádnému překrytí a nanovlákná vrstva je, v celé ploše, pouze v jedné vrstvě. Navíc nedochází k poškození vrstvy při vkládání finálního filtru do filtračního koše. Na obrázku 30 je zobrazeno schéma této varianty.



*Obrázek 30 - varianta 3*

#### *Varianta 4 - vodorovné vinutí*

Ovinutí výchozího filtru několika pásy, které jsou vinuty vodorovně. Konce pruhů mohou být spojeny sešitím či svařením. I zde dochází k překrytí, mezi jednotlivými pásy, které není žádoucí. Navíc může docházet k posunu jednotlivých pásů, a tím k odrytí výchozího filtru. Při zkušebním vkládání do filtračního koše došlo k poškození vrstvy. Obrázek 31 ilustruje způsob provedení.



*Obrázek 31 - varianta 4*

#### *Varianta 5 - varianta 1 v kombinaci se samostatným zakrytím spodní části výchozího filtru*

Tato varianta řeší složité překrytí spodní části výchozího filtru. Před ovinutím spodní části filtru dojde k vložení pruhu vrstvy, která zakryje celou spodní část originálního filtru. Dochází zde také k překrývání jednotlivých vrstev, jak při vinutí, tak i při ovíjení spodní části filtru, kde je již vložen pruh vrstvy. Při vkládání do filtračního koše může dojít

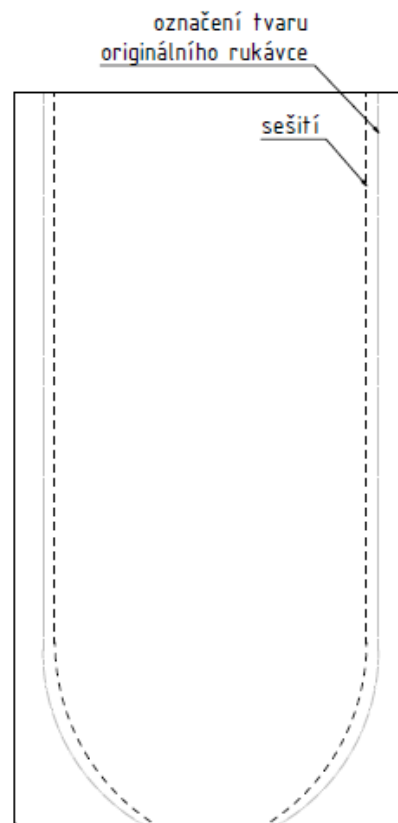


*Obrázek 32 - varianta 5*

k poškození vrstvy, stejně jako u varianty 1. Obrázek 32 ilustruje způsob provedení.

Z variant uvedených výše je vybrána varianta 3, kdy je použit pás o šířce 500 mm, což je šířka podkladové textilie, na kterou byla nanovláknenná vrstva nanášena při její výrobě. Nejdříve je podkladová textilie s nanovláknennou vrstvou, jenž má dvojnásobnou délku rukávového filtru, přeložena v polovině, a po obvodu originálního rukávového filtru vyznačen jeho tvar, viz obrázek 33. Následně jsou obě vrstvy podkladové textilie s nanovláknennou vrstvou spojeny sešitím. Tato varianta nezpůsobuje vrstvení, protože se zde neobjevuje překrytí, tudíž je nanovláknenná vrstva na podkladové textilií po celé ploše výchozího filtru pouze v jedné vrstvě. Navíc u této varianty nedochází k poškození vrstvy při vkládání výsledného filtru do perforovaného filtračního koše.

Jedná se v podstatě o vytvoření rukávového filtru



Obrázek 33 - princip vytvoření rukávce



Obrázek 34 - rukávec z nanovláknenné vrstvy nanesené na podkladové textilií

z nanovláknenné vrstvy nanesené na podkladové textilií, do kterého je následně vložen originální rukávový filtr, viz obrázek 34. Vkládání originálního rukávce do rukávce vytvořeného z nanovláknenné vrstvy musí být provedeno velmi opatrně, aby nedošlo k poškození nanovláknenné vrstvy. Vzhledem k tomu že originální rukávec je textilního charakteru, a lze jej deformovat, neměl by nastat problém. Realizace je zobrazena na obrázku 35, kde je označený tvar rukávce před sešitím a na obrázku 36 hotový rukávec. Shodný rukávec je vytvořen i pro samostatný spunbond, který sloužil jako podkladová textilie.



Obrázek 35 - označení tvaru budoucího rukávce



Obrázek 36 - hotový rukávec z nanovláknenné vrstvy nanesené na podkladové textilii

#### 4.3.3 Měření tlaku, tlakového spádu a průtoku výsledných filtrů

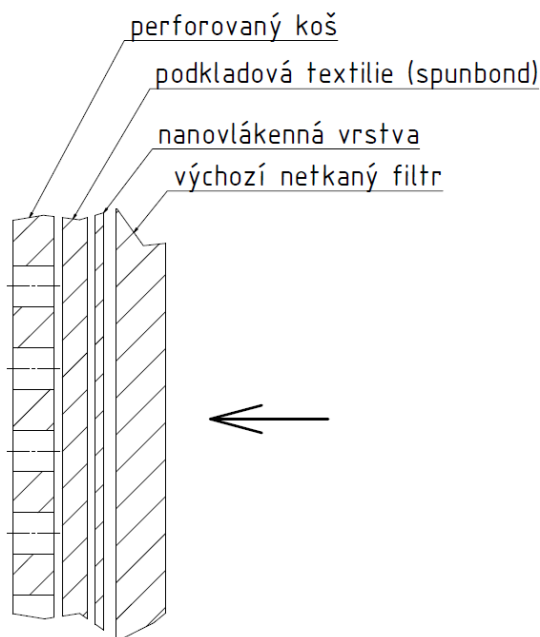
Cílem této kapitoly je stanovení filtračních veličin, jak pro původní rukávcové filtry, tak i jejich modifikace v různých provedeních. Filtry budou testovány na filtrační trati, která je detailněji popsána v rešeršní části.

*Představení testovaných filtrů:*

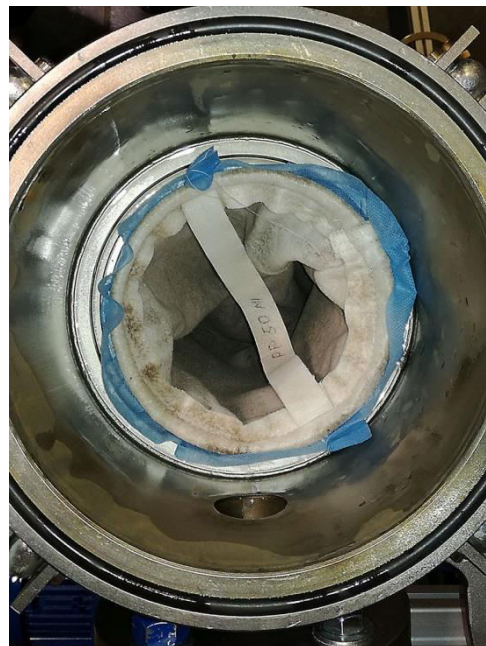
- výchozí rukávcové filtry s označením PP25 a PP50
- výchozí rukávcové filtry v kombinaci se spunbondem s označením PP25\_SB a PP50\_SB
- výchozí rukávcové filtry v kombinaci s nanovláknennou vrstvou s označením PP25\_SB\_NANO12-45 a PP50\_SB\_NANO12-45

Nanovláknenná vrstva je nanesena na netkané textilii typu spunbond. Z tohoto důvodu je nutné otestovat také vliv této netkané textilie na měřené veličiny. Proto je testován také výchozí rukávcový filtr v kombinaci se spunbondem (PP25\_SB a PP50\_SB). Filtry jsou vkládány do perforovaného koše, který tvoří mechanickou podporu filtračního rukávce.

Na obrázku 37 je ukázán řez výsledným filtrem, který je umístěn ve filtrační nádobě s vyznačeným směrem proudění kapaliny. Na obrázku 38 je potom ukázka umístěného filtru.



Obrázek 37 - řez výsledného filtru umístěného ve filtrační nádobě se znázorněním směru proudění



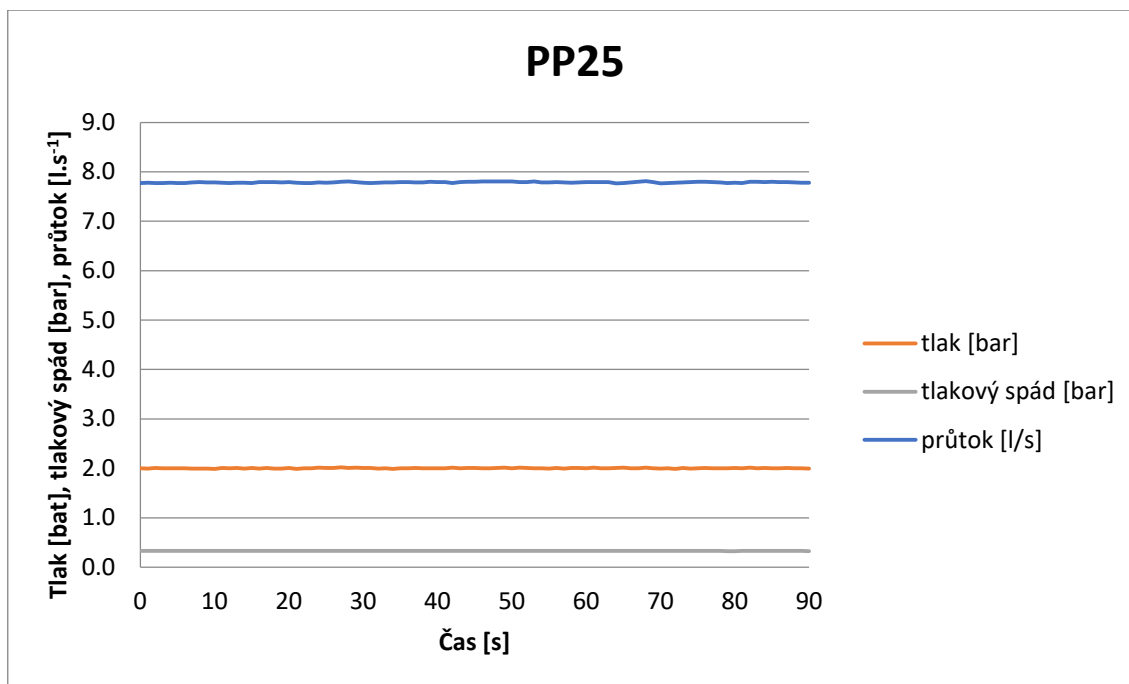
Obrázek 38 - umístění výsledného filtru do filtrační nádoby

#### *Postup měření na filtrační trati:*

- umístění a utěsnění filtru ve filtrační nádobě
- zavodnění filtrační nádoby
- ustálení filtračních charakteristik
- zaznamenání filtračních charakteristik

Měření je prováděno při otáčkách čerpadla  $2\,000\text{ min}^{-1}$  a zapisování hodnot je nastaveno na hodnotu jednoho zápisu za sekundu. Mezi sledované filtrační charakteristiky patří tlak [bar], tlakový spád [bar] a průtok vody [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Data jsou zaznamenávána po dobu 90 sekund, od okamžiku kdy dojde k ustálení sledovaných veličin, viz obrázek 39. Měřené veličiny se již v čase nemění a lze je statisticky zpracovávat.



Obrázek 39 - vzorový průběh měření

Ze zaznamenaných dat je následně určena střední hodnota, směrodatná odchylka a 95% interval spolehlivosti pro střední hodnotu. Data jsou dále statisticky vyhodnocena pomocí dvouvýběrového t-testu, což je test o shodě středních hodnot dvou nezávislých výběrů pocházejících z normálního rozdělení. Test se dále rozlišuje dle rozptylů jednotlivých výběrů, tedy zda můžeme rozptyly považovat za shodné či nikoliv. To se provádí pomocí dvouvýběrového F-testu. Také je nutno zkontrolovat normalitu dat, protože dvouvýběrový t-test lze aplikovat pouze na data pocházející z normálního rozdělení. Pokud data nepocházejí z normálního rozdělení lze použít neparametrickou alternativu - dvouvýběrový Wilcoxonův test, což je test o shodě dvou mediánů.

V prvním kroku je tedy nutné zkontrolovat normalitu dat, ať už graficky či početně. V práci byla normalita dat zjišťována pomocí Shapiro-Wilkova testu normality v programu R. Potvrzení či zamítnutí nulové hypotézy bylo provedeno na základě p-hodnoty. P-hodnota je nejnižší hladina významnosti, při které lze ještě zamítat nulovou hypotézu. Tedy pokud je p-hodnota menší než hladina významnosti  $\alpha$  lze nulovou hypotézu na této hladině významnosti zamítnout. Na obrázku 40 je ukázka výsledku z programu R. V tabulce 15 jsou zapsána jednotlivá vyhodnocení testů normality.

```
shapiro-wilk normality test
data: tlak_PP25
W = 0.98511, p-value = 0.3888
```

Pokud je výsledek "ano" tak nelze zamítnout nulovou hypotézu, to znamená, že data pocházejí z normálního rozdělení.

Obrázek 40 - ukázka výsledku testu v programu R



*Testované hypotézy:*

$H_0$ : Data pocházejí z normálního rozdělení.

$H_1$ : Data nepocházejí z normálního rozdělení.

*Tabulka 15 - výsledky testu normality*

| NORMALITA DAT     |      |     |              |     |        |     |
|-------------------|------|-----|--------------|-----|--------|-----|
| PP25              | Tlak | ano | Tlakový spád | ano | Průtok | ano |
| PP25_SB           |      | ano |              | ano |        | ano |
| PP25_SB_NANO12-45 |      | ano |              | ano |        | ano |
| PP50              | Tlak | ne  | Tlakový spád | ano | Průtok | ne  |
| PP50_SB           |      | ano |              | ano |        | ne  |
| PP50_SB_NANO12-45 |      | ano |              | ano |        | ano |

Následuje provedení dvouvýběrového F-testu na shodu rozptylů výběrů. Tento test byl prováděn pomocí programu MS Excel. Vyhodnocení je také provedeno na základě p-hodnoty. Výsledky testů jsou uvedeny v tabulce 16 a 17.

*Testované hypotézy:*

$H_0$ : Rozptyly jsou shodné.  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (15)

$H_1$ : Rozptyly nejsou shodné.  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  (16)

*Tabulka 16 - výsledky dvouvýběrového F-testu; použití spunbondu*

| SHODNÉ ROZPTYLY VÝBĚRŮ |      |     |              |     |        |     |
|------------------------|------|-----|--------------|-----|--------|-----|
| PP25                   | Tlak | ano | Tlakový spád | ano | Průtok | ano |
| PP25_SB                |      |     |              |     |        |     |
| PP50                   | Tlak | ano | Tlakový spád | ano | Průtok | ne  |
| PP50_SB                |      |     |              |     |        |     |

*Tabulka 17 - výsledky dvouvýběrového F-testu; použití nanovlákněné vrstvy*

| SHODNÉ ROZPTYLY VÝBĚRŮ |      |    |              |    |        |    |
|------------------------|------|----|--------------|----|--------|----|
| PP25                   | Tlak | ne | Tlakový spád | ne | Průtok | ne |
| PP25_SB_NANO12-45      |      |    |              |    |        |    |
| PP50                   | Tlak | ne | Tlakový spád | ne | Průtok | ne |
| PP50_SB_NANO12-45      |      |    |              |    |        |    |

Na základě výsledků dvouvýběrového F-testu je proveden dvouvýběrový t-test. Výpočet testovacího kritéria a kritického oboru se liší právě v závislosti na výsledcích

F-testu. Formulace hypotéz je pro oba typy testu stejná. Výpočet byl prováděn pomocí programu MS Excel a vyhodnocení je provedeno pomocí p-hodnoty.

*Testované hypotézy:*

$H_0$ : Střední hodnoty jsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy nemělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie nemá na testované veličiny vliv.)

$$\mu_1 = \mu_2 \rightarrow \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (17)$$

$H_1$ : Střední hodnoty nejsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy mělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie má na testované veličiny vliv.)

$$\mu_1 \neq \mu_2 \rightarrow \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (18)$$

Na data, která nepochází z normálního rozdělení nelze použít t-test. Je nutno použít dvouvýběrový Wilcoxonův test o shodě dvou mediánů. Testování bylo provedeno v programu R a vyhodnocení testu na základě p-hodnoty.

*Testované hypotézy:*

$H_0$ : Mediánové hodnoty jsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy nemělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie nemá na testované veličiny vliv.)

$$\hat{x}_1 = \hat{x}_2 \rightarrow \hat{x}_1 - \hat{x}_2 = 0 \quad (19)$$

$H_1$ : Mediánové hodnoty nejsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy mělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie má na testované veličiny vliv.)

$$\hat{x}_1 \neq \hat{x}_2 \rightarrow \hat{x}_1 - \hat{x}_2 \neq 0 \quad (20)$$

Testování pomocí dvouvýběrového Wilcoxonova testu bylo provedeno pro tlak a průtok mezi filtry PP50 a PP50\_SB a také mezi filtry PP50 a PP50\_SB\_NANO12-45. Protože alespoň u jednoho souboru dat nebyla potvrzena normalita dat.

Výsledky dvouvýběrových t-testů a dvouvýběrových Wilcoxonových testů jsou uvedeny v tabulkách 18 až 23 ve sloupci "Statistické vyhodnocení". Pokud je jako výsledek uvedeno "významný" znamená to, že přidání nanovlákněné vrstvy nebo použití spunbondu mělo statisticky významný vliv na měřené veličiny. V tabulkách se dále nacházejí střední hodnoty, směrodatné odchylky a intervaly spolehlivosti pro střední hodnotu. Dále jsou ve sloupci "rozdíl" uvedeny procentuelní rozdíly, které ukazují rozdíly měřených veličin mezi porovnávanými filtry v procentech.



*Poznámka:* Porovnání bylo prováděno mezi originálním rukávcovým filtrem a stejným originálním filtrem v kombinaci s nanovláknennou vrstvou nanosenou na spunbondu. Stejně tak i pro porovnání vlivu podkladové textilie typu spunbond.

Tabulka 18 - vliv nanovláknenné vrstvy na tlak

| TLAK [bar]        |                 |                     |                        |           |                         |            |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| Typ filtru        | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           | Statistické vyhodnocení | Rozdíl [%] |
|                   |                 |                     | Dolní mez              | Horní mez |                         |            |
| PP25              | 2,0030          | 0,0066              | 2,0016                 | 2,0044    | Významný                | 25,77      |
| PP25_SB_NANO12-45 | 2,5191          | 0,0122              | 2,5166                 | 2,5216    |                         |            |
| PP50              | 1,9761          | 0,0104              | 1,9739                 | 1,9782    | Významný                | 1,39       |
| PP50_SB_NANO12-45 | 2,0036          | 0,0075              | 2,0020                 | 2,0051    |                         |            |

Tabulka 19 - vliv nanovláknenné vrstvy na tlakový spád

| TLAKOVÝ SPÁD [bar] |                 |                     |                        |           |                         |            |
|--------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| Typ filtru         | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           | Statistické vyhodnocení | Rozdíl [%] |
|                    |                 |                     | Dolní mez              | Horní mez |                         |            |
| PP25               | 0,3295          | 0,0014              | 0,3292                 | 0,3298    | Významný                | 198,24     |
| PP25_SB_NANO12-45  | 0,9827          | 0,0167              | 0,9792                 | 0,9861    |                         |            |
| PP50               | 0,3334          | 0,0024              | 0,3329                 | 0,3339    | Významný                | 10,53      |
| PP50_SB_NANO12-45  | 0,3685          | 0,0057              | 0,3673                 | 0,3696    |                         |            |

Tabulka 20 - vliv nanovláknenné vrstvy na průtok

| PRŮTOK [l.s <sup>-1</sup> ] |                 |                     |                        |           |                         |            |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| Typ filtru                  | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           | Statistické vyhodnocení | Rozdíl [%] |
|                             |                 |                     | Dolní mez              | Horní mez |                         |            |
| PP25                        | 7,7874          | 0,0097              | 7,7854                 | 7,7894    | Významný                | -4,15      |
| PP25_SB_NANO12-45           | 7,4641          | 0,0077              | 7,4625                 | 7,4657    |                         |            |
| PP50                        | 7,7363          | 0,0202              | 7,7321                 | 7,7404    | Významný                | -0,30      |
| PP50_SB_NANO12-45           | 7,7130          | 0,0066              | 7,7116                 | 7,7143    |                         |            |

Přidání nanovláknenné vrstvy má statisticky významný vliv na všechny filtrační veličiny. A to jak v kombinaci s originálním rukávcovým filtrem s označením PP25, tak i v kombinaci s filtrem označeným PP50. Při porovnání intervalů spolehlivosti je dosaženo stejných výsledků, kdy ani v jednom případě nedochází k překrytí intervalů spolehlivosti.

Při použití nanovláknenné vrstvy s PP25 došlo k růstu tlaku o cca 25 % a dvojnásobnému zvýšení tlakového spádu. Průtok zde klesl o zhruba 5 %. Naopak výsledný filtr

s označením PP50\_SB\_NANO12-45 vykazuje obdobné hodnoty jako originální rukávcový filtr, a to i přes to, že rozdíly byly statisticky významné. Tlak vzrostl o zhruba 1,5 % a tlakový spád o cca 10 %. Na průtok nemělo přidání nanovlákněné vrstvy téměř žádný vliv. U tohoto filtru došlo k poklesu průtoku v desetinách procent.

Dále byl zjišťován také vliv podkladové textilie typu spunbond na měřené veličiny. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 21 - vliv spunbondu na tlak

| TLAK [bar] |                 |                     |                        |           |                         |            |
|------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| Typ filtru | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           | Statistické vyhodnocení | Rozdíl [%] |
|            |                 |                     | Dolní mez              | Horní mez |                         |            |
| PP25       | 2,0030          | 0,0066              | 2,0016                 | 2,0044    | Významný                | -1,75      |
| PP25_SB    | 1,9679          | 0,0058              | 1,9667                 | 1,9691    |                         |            |
| PP50       | 1,9761          | 0,0104              | 1,9739                 | 1,9782    | Významný                | -1,99      |
| PP50_SB    | 1,9368          | 0,0095              | 1,9348                 | 1,9387    |                         |            |

Tabulka 22 - vliv spunbondu na tlakový spád

| TLAKOVÝ SPÁD [bar] |                 |                     |                        |           |                         |            |
|--------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| Typ filtru         | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           | Statistické vyhodnocení | Rozdíl [%] |
|                    |                 |                     | Dolní mez              | Horní mez |                         |            |
| PP25               | 0,3295          | 0,0014              | 0,3292                 | 0,3298    | Významný                | -0,98      |
| PP25_SB            | 0,3263          | 0,0013              | 0,3260                 | 0,3266    |                         |            |
| PP50               | 0,3334          | 0,0024              | 0,3329                 | 0,3339    | Významný                | -1,07      |
| PP50_SB            | 0,3298          | 0,0024              | 0,3293                 | 0,3303    |                         |            |

Tabulka 23 - vliv spunbondu na průtok

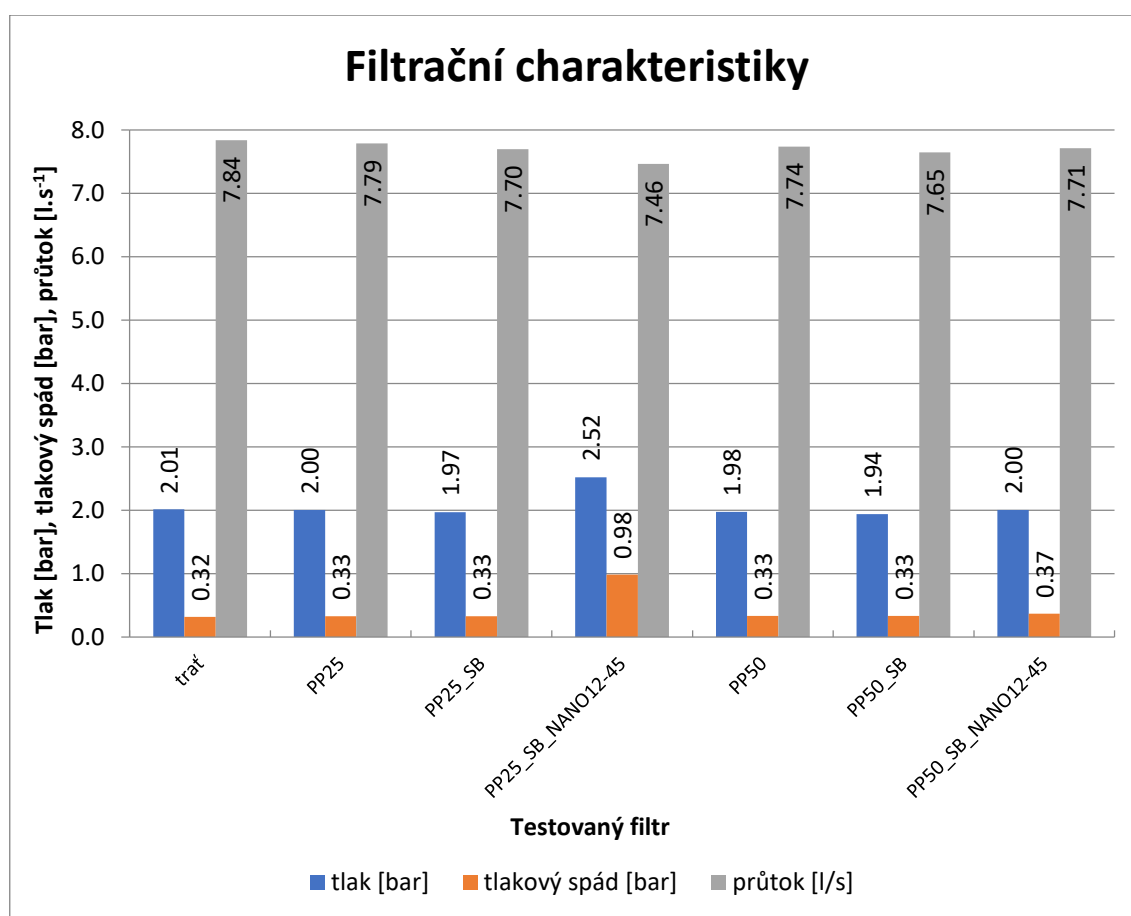
| PRŮTOK [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ] |                 |                     |                        |           |                         |            |
|---|-----------------|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| Typ filtru                              | Střední hodnota | Směrodatná odchylka | 95% IS střední hodnoty |           | Statistické vyhodnocení | Rozdíl [%] |
|   |                 |                     | Dolní mez              | Horní mez |                         |            |
| PP25                                    | 7,7874          | 0,0097              | 7,7854                 | 7,7894    | Významný                | -1,16      |
| PP25_SB                                 | 7,6974          | 0,0097              | 7,6954                 | 7,6994    |                         |            |
| PP50                                    | 7,7363          | 0,0202              | 7,7321                 | 7,7404    | Významný                | -1,18      |
| PP50_SB                                 | 7,6453          | 0,0105              | 7,6431                 | 7,6475    |                         |            |

Použití spunbondu v konstrukci výsledného filtru má také statisticky významný vliv na všechny měřené veličiny v kombinaci s oběma typy výchozích filtrů. Stejně jako u předešlého porovnání jsou i zde hodnoty vyjádřeny pomocí procent. Zajímavé je, že vliv spunbondu na tlak a tlakový spád je opačný, tedy dochází ke snížení těchto hodnot.

Ovšem i když je vliv spunbondu statisticky významný veškeré rozdíly se pohybují pouze v jednotkách procent do maximální hodnoty 2 %.

Výpočty a vyhodnocení všech provedených testů (Shapiro-Wilkův test, F-test, t-test, Wilcoxonův test) jsou uvedeny v přílohách číslo 03 až 06.

Na obrázku 41 je sloupcový graf, ve kterém jsou zobrazeny měřené filtrační veličiny pro všechny testované filtry a samostatnou trať. Všechny naměřené hodnoty jsou velmi podobné i přesto, že rozdíly mezi nimi jsou statisticky významné. Výjimku tvoří pouze výsledný filtr s označením PP25\_SB\_NANO12-45, u kterého došlo k výraznějším změnám tlaku a tlakového spádu.



Obrázek 41 - graf měřených filtračních charakteristik pro všechny testované filtry

## 5. DISKUZE

Při stanovení filtrační účinnosti na samostatných nanovlákných vrstvách bylo dosaženo výsledků, ze kterých vyplývá ideální plošná hmotnost nanovlákné vrstvy. Pro obě koncentrace odpovídají rychlosti odtahu podkladové textilie  $45\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , pro 10% koncentraci se jedná o hodnotu plošné hmotnosti  $0,93\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  a pro 12% koncentraci o hodnotu  $1,28\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pro obě plošné hmotnosti se filtrační účinnost nanovlákné vrstvy pohybuje nad hodnotou 97 %. Možným bodem k dalšímu zkoumání je přesnější stanovení ideální plošné hmotnosti. Vytvoření nových nanovlákných vrstev s plošnou hmotností okolo stanovených hodnot pro zjištění, zda nedojde k dalšímu zvýšení filtrační účinnosti. Koncentrace polymerních roztoků neměla statisticky významný vliv na filtrační účinnost. Rozdíl ve filtrační účinnosti tvoří použitá plošná hmotnost. V kombinaci s výchozími filtry při požadavku na filtrační účinnost se jeví použití výchozího filtru s označením PP25 jako ideální volba. U tohoto filtru je dosaženo vyšších hodnot účinnosti u obou koncentrací. Jedním z důvodů proč k tomu dochází může být rychlejší zanášení nanovlákné vrstvy při použití výchozího filtru s většími póry. Dalším důvodem může být uvolnění shluků nečistot, které byly zadržovány ve výchozím filtru, čímž mohlo dojít k poškození nanovlákné vrstvy. Těmito možnostmi by bylo dobré se dále zabývat a sledovat jejich vliv na filtrační účinnost.

Pro aplikaci nanovlákné vrstvy na výchozí rukávcový filtr byla zvolena varianta, která spočívá ve vytvoření rukávcového filtru z nanovlákné vrstvy, která je nanesena na podkladové textilii a je umístěna vně výchozího filtru. Jako vhodné spoje se zde jeví použití podlepených švů či použití svařovaných spojů.

Při použití nanovlákné vrstvy v kombinaci s výchozím filtrem s označením PP25 došlo k výraznému zvýšení filtrační účinnosti (96 %). Došlo ovšem k prudkému nárůstu tlakového spádu o cca 200 %, kdy vzrostl tlak před filtrem a naopak tlak za filtrem klesl vlivem proudění kapaliny skrz filtr. Nárůst tlakového spádu vzhledem k dosažené filtrační účinnosti byl očekáván. Naopak hodnota průtoku klesla o pouhých cca 5 %.

Ze získaných výsledků vyplývá, že spunbond, který byl použit jako podkladová textilie při výrobě nanovlákné vrstvy, ovlivňuje některé z měřených veličin. Jmenovitě průtok a tlak. Dochází ovšem ke změnám v jednotkách procent, které jsou při použitých průtocích (přibližně  $8\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) téměř zanedbatelné, avšak statisticky významné. Vzhledem

k dosaženým výsledkům lze říci, že použití netkané textilie typu spunbond v konstrukci filtru nemá negativní účinky na charakteristiky tlaku a průtoku. Navíc je již součástí nanovlákněné vrstvy při jejím vzniku, kdy slouží jako podkladová textilie. Zároveň má ochrannou funkci ve výsledném filtru, kde chrání nanovlákněnou vrstvu před mechanickým poškozením, ke kterému by mohlo dojít během provozu.

Z naměřených dat a zjištěných hodnot vyplývá možné budoucí použití modifikovaných filtrů. Při použití výchozího filtru s nižším průměrem pórů (označení PP25) získáme vysokou filtrační účinnost (96 %) ovšem na úkor průtoku, který se sníží o cca 5 %. Naopak při použití netkaného filtru s označením PP50 budou zachovány charakteristiky tlaku i průtoku a filtrační účinnost se sníží na přibližně 87 %.

Filtry jsou navrhovány na kapalinovou filtraci. Oblast použití vhodná pro aplikaci těchto filtrů je filtrace průmyslových vod, přesněji její dočišťování pro opětovné použití nebo před jejím vypuštěním do kanalizace. Filtry mohou být instalovány před vypuštěním odpadní vody do kanalizace. Zde mohou zachytávat částice, které by mohly zanášet kanalizaci, částice drahých kovů či toxické částice. Nebo mohou být filtry použity jako jemná filtrace, v kombinaci s dalšími filtry, při nutnosti cirkulace vody. Například ve strojírenství je lze použít na filtraci emulzí a chladících kapalin. Zde by částice obsažené v kapalinách mohly způsobit otupení řezných nástrojů či poškození výrobku. Další oblastí aplikace je zdravotnictví, kde mohou sloužit pro filtraci odpadních vod nemocnic či při výrobě léků, kdy nanovlákněná vrstva zachytává i částice o velikosti 0,5  $\mu\text{m}$ .

Nanovlákněnou vrstvu v konstrukci filtru by bylo možné nahradit meltblownovou textilií. Meltblown je netkaná textilie, která vzniká strháváním polymerní taveniny proudem vzduchu. Průměr vznikajících vláken je téměř srovnatelný s průměrem hrubších nanovláken. Lze vyrábět i vlákna o průměru desetiny mikrometru. Výhodou meltblownové textilie je rychlost výroby a s tím spojená nižší cena oproti výrobě nanovláken. Další možností nahrazení je použití vrstvy kombinující technologii spunbond a meltblown, například SMS (spunbond-meltblown-spunbond). Kombinací získáme výhody obou technologií, jako jsou lepší mechanické vlastnosti spunbondu a lepší sorpční a filtrační vlastnosti meltblownu.

## 6. ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést optimalizaci filtračních vlastností netkaných filtrů pro kapalinovou filtraci s dosažením vyšší filtrační účinnosti s minimální změnou tlakového spádu a průtoku.

Bylo provedeno studium možností pro zlepšení filtračních vlastností a navrženo několik variant realizovatelných na dostupných filtrech. Jako nejvhodnější varianta byla zvolena aplikace nanovláknenné vrstvy. Vrstvy byly kombinovány s polypropylenovými netkanými filtry rukávcového tvaru.

U výchozích filtrů, nanovláknenných vrstev a jejich kombinací byla zjišťována filtrační účinnost. Nanovláknenné vrstvy dosahovaly nejvyšší filtrační účinnosti i oproti modifikovaným filtrům, tj. výchozím filtrům v kombinaci s nanovláknennou vrstvou. I přesto dosahovaly modifikované filtry vysoké filtrační účinnosti. Měření ukázalo, že plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy má vliv na filtrační účinnost. Kdy nejdříve filtrační účinnost s rostoucí plošnou hmotností roste, ale v určitém bodě začne klesat. Stanovení ideální plošné hmotnosti může být bodem k dalšímu zkoumání. Na základě výsledků filtrační účinnosti byla zvolena nanovláknenná vrstva, která byla použita pro testování charakteristik tlaku a průtoku na filtrační trati pro kapalinovou filtraci.

Z výsledků testovaných veličin (tlak, tlakový spád, průtok) bylo zjištěno, že při aplikaci dané nanovláknenné vrstvy záleží také na velikosti průměru pórů výchozích filtrů. Při použití výchozího filtru s menšími póry došlo k výraznému zvýšení tlakového spádu a mírnému poklesu průtoku. Naopak použití výchozího filtru s většími póry nezpůsobilo téměř žádný pokles průtoku a mírný vzrůst tlakového spádu. Ovšem při použití tohoto filtru je dosahováno nižší filtrační účinnosti v porovnání s výchozím filtrem, který má menší průměr pórů.

V konstrukci výsledného filtru se nachází také spunbond, který sloužil jako podkladová textilie při výrobě nanovláknenných vrstev. Proto byl zjišťován také vliv spunbondu na testované veličiny. Při statistickém ověření bylo zjištěno, že spunbond má významný vliv na testované veličiny, ale při procentuelním porovnání se ukázalo, že vzhledem k dosahovaným hodnotám je tento vliv zanedbatelný.

Výsledkem práce jsou modifikované filtry pro kapalinovou filtraci, které je možno použít pro čištění průmyslových vod, např. ve strojírenském či zdravotním průmyslu.

## 7. LITERATURA

- [1] HRŮZA, Jakub. *Filtration - přednášky z předmětu Textilie pro průmyslové aplikace*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.
- [2] ŠULC, Jaroslav a Jiří ŠINTÁK. *Právní problematika a ochrana životního prostředí (Ochrana životního prostředí): Určeno posl. 4. roč. fak. strojní a textilní*. Liberec: Vys. škola strojní a textilní, 1990, 91 s. ISBN 80-7083-027-1
- [3] CHEREMISINOFF, Nicholas P. *Handbook of Water and wastewater treatment technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002, 636 s. ISBN 0-7506-7498-9.
- [4] HRŮZA, Jakub. *Zlepšování filtračních vlastností vlákninových materiálů. Kandidátská disertační práce*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.
- [5] ČSN EN ISO 16890-3 (12 5009). *Vzduchové filtry pro všeobecné větrání - Část 3: Stanovení účinnosti gravimetrické metody a odporu proti proudění vzduchu pomocí hmotnosti zachyceného zkušebního prachu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [6] HORNYCH, Petr. *Návrh a realizace zařízení pro testování vodních filtrů textilního charakteru. Diplomová práce*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2018.
- [7] HRŮZA, Jakub. *Filtrace - přednášky z předmětu Aplikace nanomateriálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.
- [8] RŮŽIČKOVÁ, Jana. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. Vyd. 2. nezměn. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 54 s. ISBN 80-7372-066-3.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6
- [10] YALCINKAYA, Fatma. Preparation of various nanofiber layers using wire electrospinning system. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.12.012>.
- [11] TB 300 IR with battery. *Lovibond Water Testing and Colour Measurement* [online]. Copyright ©2019 Tintometer GmbH [cit. 13.04.2019]. Dostupné z: <https://www.lovibond.com/en/PM/Water-Testing/Products/Lab-Portable-Instruments/Turbidity/TB-300-IR/TB-300-IR-with-battery>

## **8. SEZNAM PŘÍLOH**

|    |  |
|----|--|
| 01 | Naměřené hodnoty zákalu  |
| 02 | Graficky zobrazená data z jednotlivých měření na filtrační trati |
| 03 | Shapiro-Wilkův test  |
| 04 | F- test rovnosti dvou rozptylů                                   |
| 05 | Dvouvýběrový t-test  |
| 06 | Dvouvýběrový Wilcoxonův test                                     |
| 07 | Data z jednotlivých měření na filtrační trati (pouze na CD)      |



## 9. SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 - princip setrvačného záchytu [1] .....   | 12 |
| Obrázek 2 - princip difuzního záchytu [1] .....   | 13 |
| Obrázek 3 - ukázka programu pro obsluhu filtrační tratě [6] .....   | 18 |
| Obrázek 4 - filtrační trať [6] .....  | 19 |
| Obrázek 5 - skládaný filtr .....  | 22 |
| Obrázek 6 - extrémní případ skládaného filtru .....   | 23 |
| Obrázek 7 - vrstvený filtr .....  | 24 |
| Obrázek 8 - netkaný filtr s nanovláknennou vrstvou .....  | 24 |
| Obrázek 9 - kalandrování .....  | 24 |
| Obrázek 10 - netkaný filtr se zátěrem .....   | 25 |
| Obrázek 11 - použité laboratorní zařízení nanospider .....  | 30 |
| Obrázek 12 - schéma nanospideru [10] .....  | 31 |
| Obrázek 13 - detail použitého laboratorního zařízení .....  | 32 |
| Obrázek 14 - střední hodnoty průměrů vláken s intervaly spolehlivosti .....   | 35 |
| Obrázek 15 - nanovláknenná vrstva; 8% koncentrace; 5 000× zvětšení .....  | 35 |
| Obrázek 16 - nanovláknenná vrstva; 10% koncentrace; 5 000× zvětšení .....   | 36 |
| Obrázek 17 - nanovláknenná vrstva; 12% koncentrace; 5 000× zvětšení .....   | 36 |
| Obrázek 18 - konstrukce výsledného filtru (1 - netkaný filtr; 2 - nanovláknenná vrstva; 3 - podkladová textilie typu spunbond); šipka znázorňuje směr proudění kapaliny .....   | 37 |
| Obrázek 19 - laboratorní sestava pro podtlakovou filtraci .....   | 39 |
| Obrázek 20 - postup sestavení filtrační sestavy (vlevo - filtrační nástavec upevněný na sběrné láhvi, uprostřed - vložený nosič filtru s těsněním pro umístění testovaného filtru, vpravo - kompletní sestava s vloženým vzorkem) ..... | 39 |
| Obrázek 21 - Turbidimetr TB 300 IR [11] .....   | 40 |
| Obrázek 22 - filtrační účinnost výchozích netkaných filtrů .....  | 42 |
| Obrázek 23 - filtrační účinnost nanovláknenných vrstev na podkladové textilií .....   | 43 |
| Obrázek 24 - filtrační účinnost výsledných filtrů v kombinaci s nanovrstvou vyrobenou z 10% roztoku .....   | 45 |
| Obrázek 25 - filtrační účinnost výsledných filtrů v kombinaci s nanovrstvou vyrobenou z 12% roztoku .....   | 45 |
| Obrázek 26 - filtrační účinnost; koncentrace roztoku 10% .....  | 46 |
| Obrázek 27 - filtrační účinnost; koncentrace roztoku 12% .....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 28 - varianta 1 .....   | 48 |
| Obrázek 29 - varianta 2.....  | 48 |
| Obrázek 30 - varianta 3.....  | 49 |
| Obrázek 31 - varianta 4.....  | 49 |
| Obrázek 32 - varianta 5.....  | 49 |
| Obrázek 33 - princip vytvoření rukávce .....  | 50 |
| Obrázek 34 - rukávec z nanovlákněné vrstvy nanesené na podkladové textilii .....                      | 50 |
| Obrázek 35 - označení tvaru budoucího rukávce.....  | 51 |
| Obrázek 36 - hotový rukávec z nanovlákněné vrstvy nanesené na podkladové textilii .                   | 51 |
| Obrázek 37 - řez výsledného filtru umístěného ve filtrační nádobě se znázorněním směru proudění ..... | 52 |
| Obrázek 38 - umístění výsledného filtru do filtrační nádoby .....                                     | 52 |
| Obrázek 39 - vzorový průběh měření .....  | 53 |
| Obrázek 40 - ukázka výsledku testu v programu R .....   | 53 |
| Obrázek 41 - graf měřených filtračních charakteristik pro všechny testované filtry.....               | 58 |

## 10. SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 - přehled základních parametrů základních filtrů .....                             | 21 |
| Tabulka 2 - hodnocení vlastností jednotlivých návrhů .....                                   | 26 |
| Tabulka 3 - receptury pro přípravu vzorků .....  | 30 |
| Tabulka 4 - podmínky zvlákňování .....   | 32 |
| Tabulka 5 - hmotnosti vzorků o rozměru 5×5 cm .....  | 33 |
| Tabulka 6 - přepočítané plošné hmotnosti na jeden metr čtvereční .....                       | 33 |
| Tabulka 7 - střední hodnoty průměrů vláken s intervaly spolehlivosti.....                    | 34 |
| Tabulka 8 - parametry vyrobených nanovláknenných vrstev .....                                | 38 |
| Tabulka 9 - označení jednotlivých kombinací .....  | 38 |
| Tabulka 10 - hodnoty zákalu kontaminované vody .....   | 40 |
| Tabulka 11 - průměrná filtrační účinnost pro samostatné základní filtry .....                | 41 |
| Tabulka 12 - průměrná filtrační účinnost nanovláknenných vrstev na podkladové textilii ..... | 42 |
| Tabulka 13 - průměrná filtrační účinnost při použití výchozího filtru PP 25 .....            | 44 |
| Tabulka 14 - průměrná filtrační účinnost při použití výchozího filtru PP 50 .....            | 44 |
| Tabulka 15 - výsledky testu normality .....  | 54 |
| Tabulka 16 - výsledky dvouvýběrového F-testu; použití spunbondu .....                        | 54 |
| Tabulka 17 - výsledky dvouvýběrového F-testu; použití nanovláknenné vrstvy .....             | 54 |
| Tabulka 18 - vliv nanovláknenné vrstvy na tlak .....   | 56 |
| Tabulka 19 - vliv nanovláknenné vrstvy na tlakový spád .....                                 | 56 |
| Tabulka 20 - vliv nanovláknenné vrstvy na průtok .....                                       | 56 |
| Tabulka 21 - vliv spunbondu na tlak .....  | 57 |
| Tabulka 22 - vliv spunbondu na tlakový spád .....  | 57 |
| Tabulka 23 - vliv spunbondu na průtok .....  | 57 |

## **PŘÍLOHY**

## PŘÍLOHA 01

Naměřené hodnoty zákalu pro výchozí filtry, nanovlákněné vrstvy a jejich kombinace, které byly použity pro výpočet filtrační účinnosti. Hodnoty zákalu kontaminované vody a hodnota zákalu destilované vody, která byla odečtena od všech naměřených hodnot.

Tabulka 1 - zákal destilované vody

| Zákal destilované vody [NTU] |
|------------------------------|
| 0,29                         |

Tabulka 2 - Zákal kontaminované vody

| Zákal kontaminované vody [NTU]     |
|------------------------------------|
| 27,8 24,0 18,0 22,4 27,8 19,3 18,9 |

Tabulka 3 - Hodnoty zákalu pro filtr PP25\_SB\_NANO10

| Zákal [NTU]                   | PP25_SB_NANO10 |          |          |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|
| Odtah [mm.min <sup>-1</sup> ] | Měření 1       | Měření 2 | Měření 3 |
| 12                            | 3,57           | 3,58     | 2,38     |
| 23                            | 0,55           | 2,17     | 1,62     |
| 45                            | 0,74           | 0,67     | 1,11     |
| 68                            | 1,69           | 2,02     | 3,41     |

Tabulka 4 - Hodnoty zákalu pro filtr PP50\_SB\_NANO10

| Zákal [NTU]                   | PP50_SB_NANO10 |          |          |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|
| Odtah [mm.min <sup>-1</sup> ] | Měření 1       | Měření 2 | Měření 3 |
| 12                            | 7,58           | 7,90     | 7,97     |
| 23                            | 5,81           | 6,56     | 6,84     |
| 45                            | 4,18           | 5,49     | 4,12     |
| 68                            | 5,81           | 4,53     | 5,74     |

Tabulka 5 - Hodnoty zákalu pro filtr PP25\_SB\_NANO12

| Zákal [NTU]                   | PP25_SB_NANO12 |          |          |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|
| Odtah [mm.min <sup>-1</sup> ] | Měření 1       | Měření 2 | Měření 3 |
| 12                            | 1,79           | 1,34     | 1,95     |
| 23                            | 1,38           | 1,51     | 1,36     |
| 45                            | 0,74           | 1,07     | 1,53     |
| 68                            | 1,88           | 2,63     | 1,85     |

Tabulka 5 - Hodnoty zákalu pro filtr PP50\_SB\_NANO12

| Zákal [NTU]                   | PP50_SB_NANO12 |          |          |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|
| Odtah [mm.min <sup>-1</sup> ] | Měření 1       | Měření 2 | Měření 3 |
| 12                            | 8,19           | 7,57     | 6,38     |
| 23                            | 5,50           | 6,27     | 5,43     |
| 45                            | 3,04           | 3,45     | 3,21     |
| 68                            | 6,29           | 5,24     | 5,83     |

Tabulka 6 - Hodnoty zákalu pro nanovrstvu z 10% roztoku Tabulka 7 - Hodnoty zákalu pro nanovrstvu z 12% roztoku

| Zákal [NTU]                   | NANO12   |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| Odtah [mm.min <sup>-1</sup> ] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 |
| 12                            | 1,51     | 0,76     | 1,22     |
| 23                            | 0,31     | 1,22     | 0,73     |
| 45                            | 0,51     | 0,43     | 0,46     |
| 68                            | 1,88     | 2,15     | 2,56     |

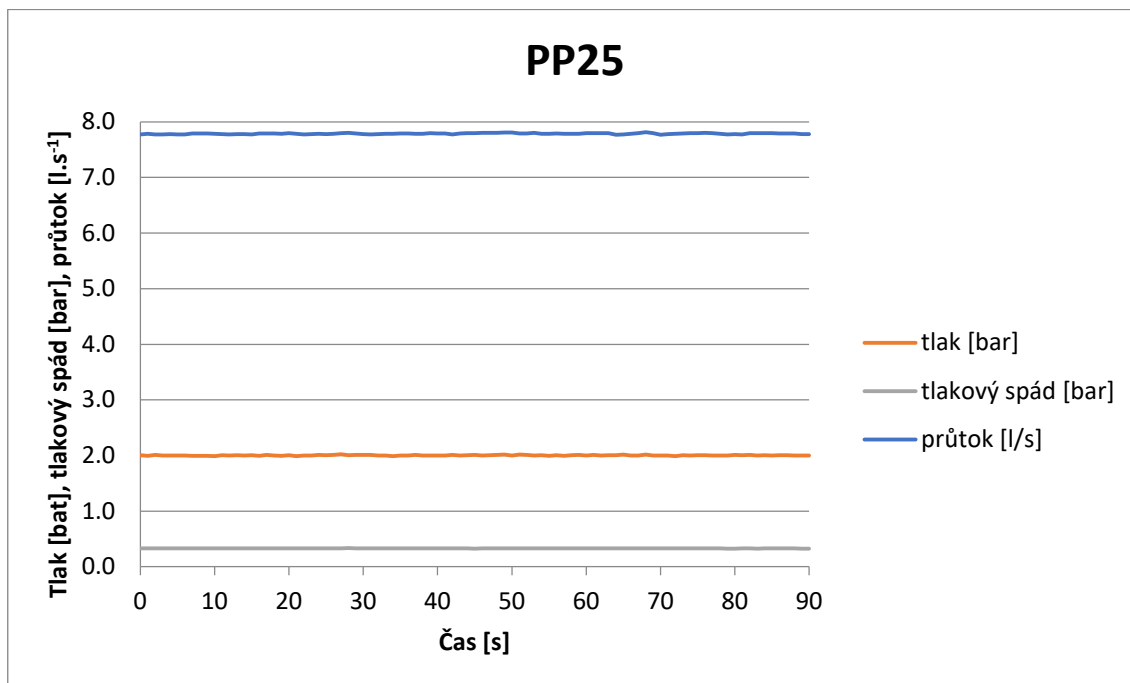
| Zákal [NTU]                   | NANO10   |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| Odtah [mm.min <sup>-1</sup> ] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 |
| 12                            | 1,35     | 0,80     | 0,67     |
| 23                            | 1,07     | 0,78     | 0,85     |
| 45                            | 0,62     | 1,00     | 0,58     |
| 68                            | 1,45     | 2,20     | 1,78     |

*Tabulka 8 - Hodnoty zákalu pro filtr PP25 a filtr PP50*

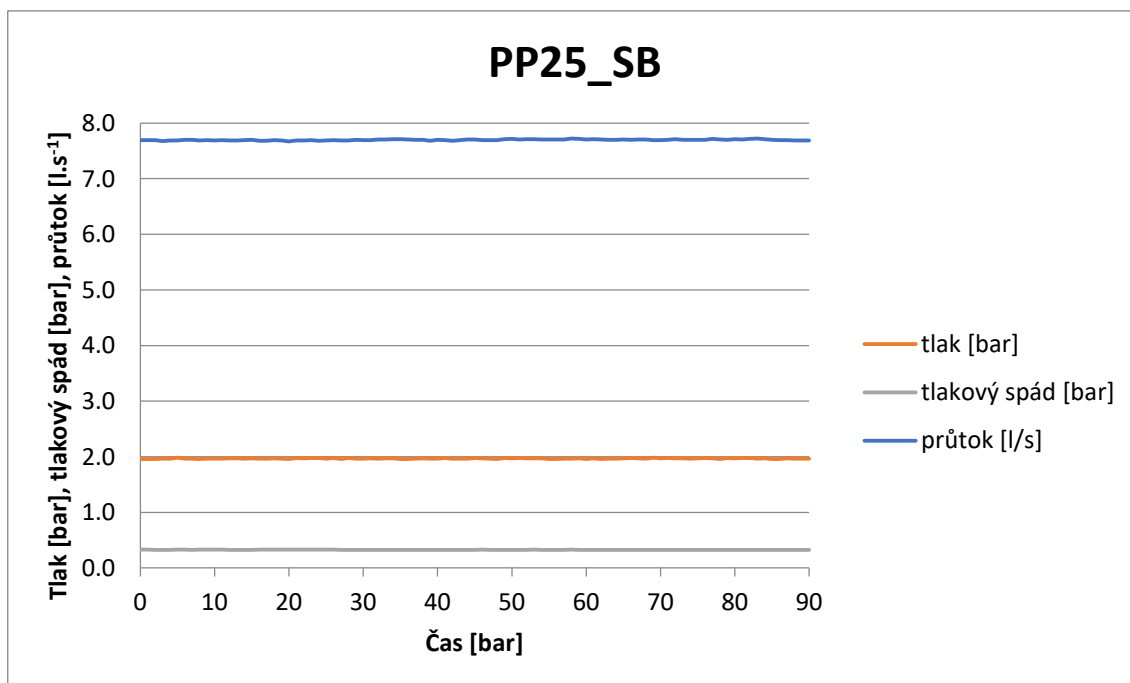
| Zákal [NTU] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 |
|-------------|----------|----------|----------|
| PP25        | 18,66    | 17,10    | 18,35    |
| PP50        | 18,82    | 18,66    | 18,51    |

## PŘÍLOHA 02

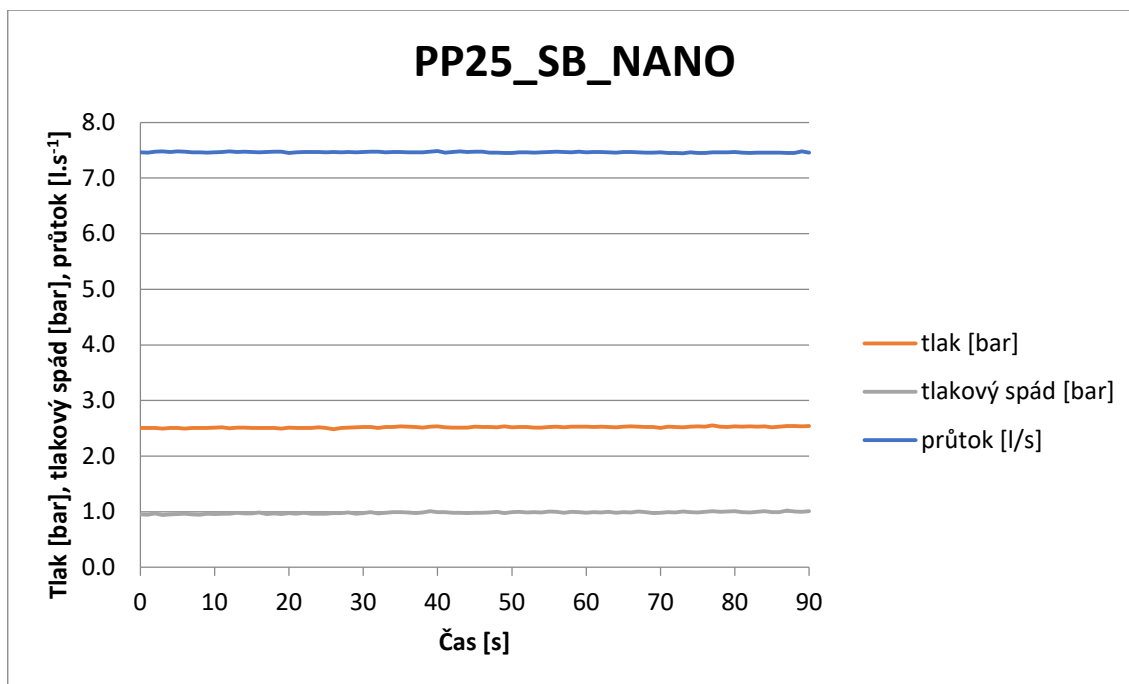
Grafické znázornění naměřených dat - tlaku, tlakového spádu a průtoku - pro jednotlivé testované filtry a samostatnou trať.



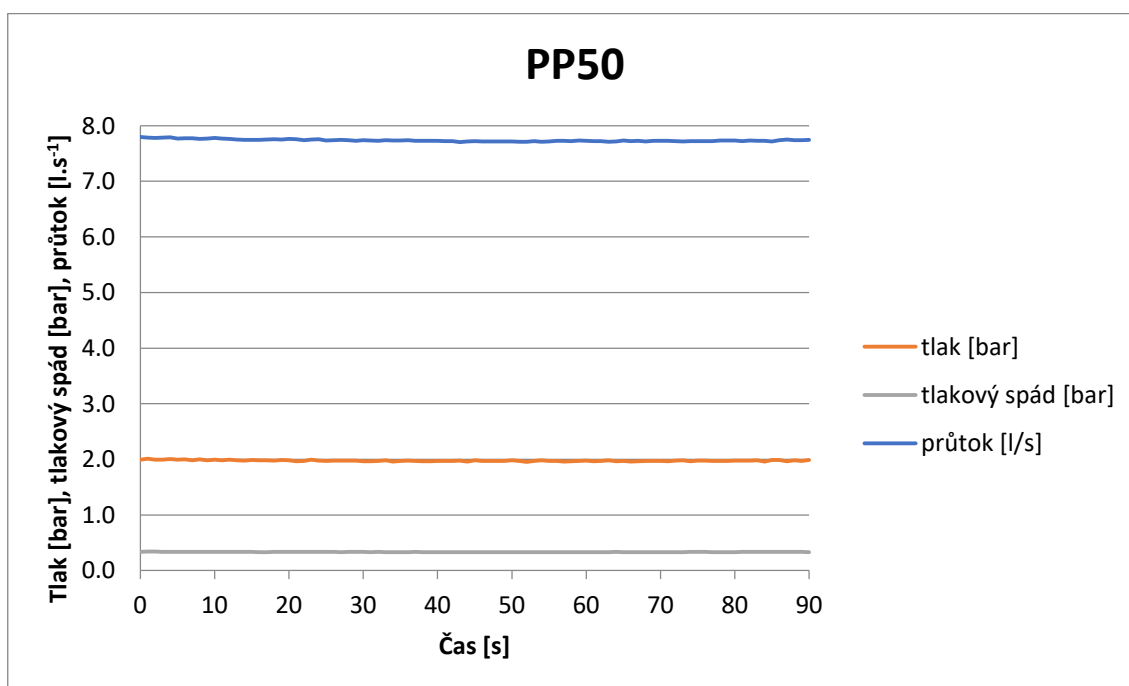
Obrázek 1 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku pro filtr PP25



Obrázek 2 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku pro filtr PP25\_SB

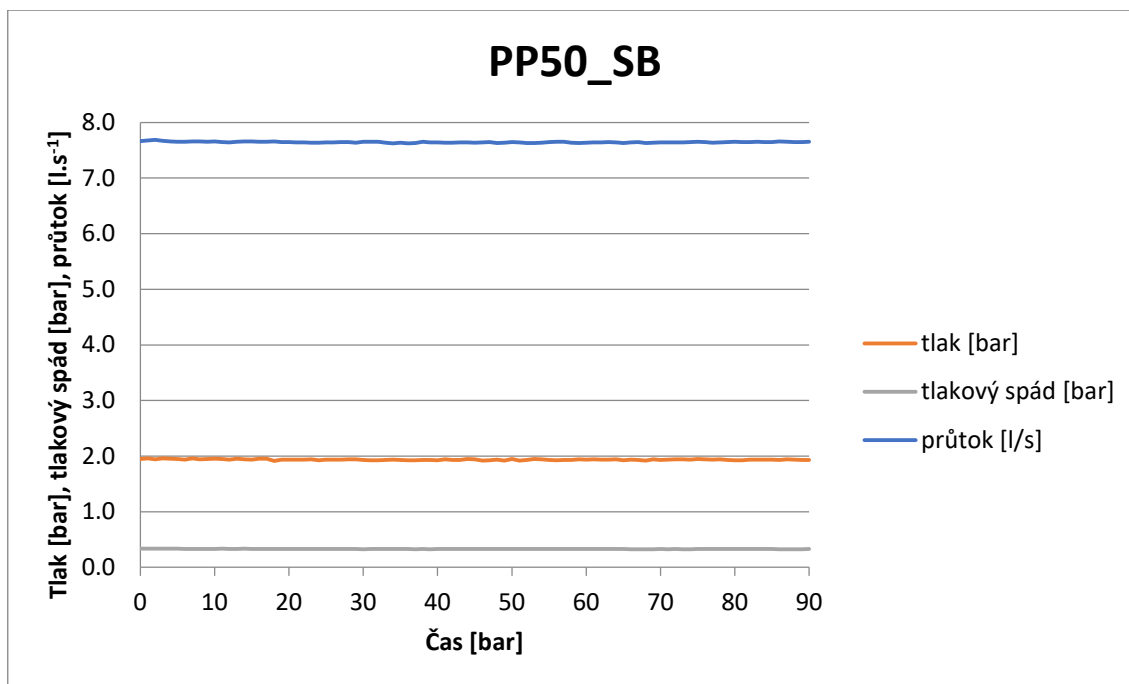


Obrázek 3 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku pro filtr PP25\_SB\_NANO12-45

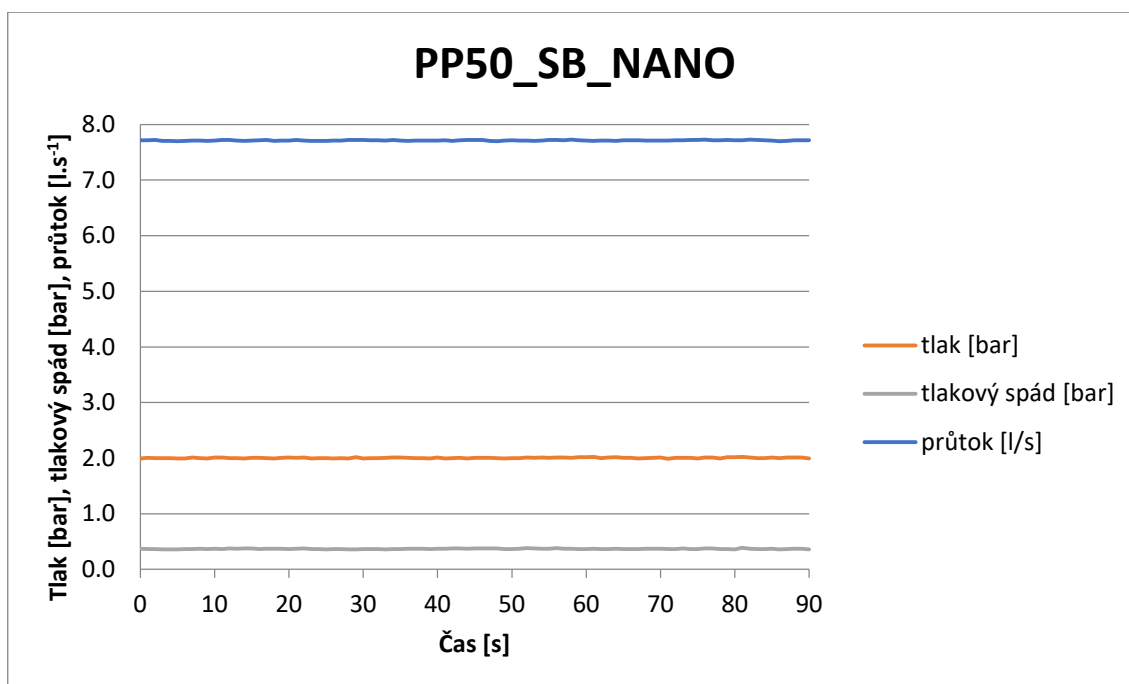


Obrázek 4 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku pro filtr PP50

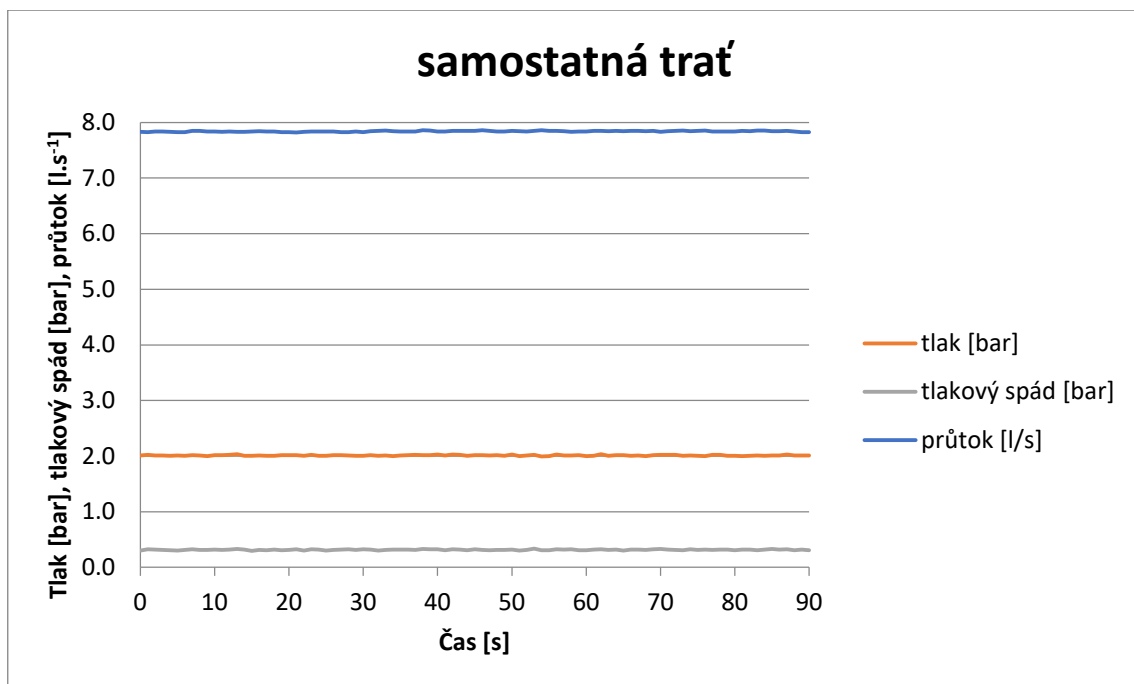




Obrázek 5 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku pro filtr PP50\_SB



Obrázek 6 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku pro filtr PP50\_SB\_NANO12-45



Obrázek 7 - charakteristiky tlaku, tlakového spádu a průtoku samostatné trati

## PŘÍLOHA 03

Shapiro-Wilkův test normality provedený v programu R. Vyhodnocení bylo provedeno na základě porovnání p-hodnoty s hladinou významnosti. Testování bylo provedeno na hladině významnosti 5%, tzn.  $\alpha=0,05$ . Pokud je p-hodnota menší než hladina významnosti je nulová hypotéza zamítnuta.

$H_0$ : Data pocházejí z normálního rozdělení.

$H_1$ : Data nepocházejí z normálního rozdělení.

```
shapiro-wilk normality test
data: tlak_PP25
W = 0.98511, p-value = 0.3888
```

*Obrázek 1 - test normality dat pro filtr PP25; tlak*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

```
shapiro-wilk normality test
data: tlakovy.spad_PP25
W = 0.99201, p-value = 0.8627
```

*Obrázek 2 - test normality dat pro filtr PP25; tlakový spád*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

```
shapiro-wilk normality test
data: prutok_PP25
W = 0.98768, p-value = 0.5538
```

*Obrázek 3 - test normality dat pro filtr PP25; průtok*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

```
shapiro-wilk normality test
data: tlak_PP25_SB
W = 0.98306, p-value = 0.2852
```

*Obrázek 4 - test normality dat pro filtr PP25\_SB; tlak*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlakovy.spad_PP25_SB  
w = 0.9893, p-value = 0.6727
```

*Obrázek 5 - test normality dat pro filtr PP25\_SB; tlakový spád*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: prutok_PP25_SB  
w = 0.99373, p-value = 0.9482
```

*Obrázek 6 - test normality dat pro filtr PP25; průtok*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlak_PP25_SB_NANO  
w = 0.98344, p-value = 0.3026
```

*Obrázek 7 - test normality dat pro filtr PP25\_SB\_NANO12-45; tlak*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlakovy.spad_PP25_SB_NANO  
w = 0.98257, p-value = 0.2641
```

*Obrázek 8 - test normality dat pro filtr PP25\_SB\_NANO12-45; tlakový spád*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: prutok_PP25_SB_NANO  
w = 0.98793, p-value = 0.5715
```

*Obrázek 9 - test normality dat pro filtr PP25\_SB\_NANO12-45; průtok*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlak_PP50  
w = 0.95527, p-value = 0.003361
```

*Obrázek 10 - test normality dat pro filtr PP50; tlak*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlakovy.spad_PP50  
w = 0.9731, p-value = 0.0562
```

*Obrázek 11 - test normality dat pro filtr PP50; tlakový spád*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: prutok_PP50  
w = 0.91071, p-value = 1.14e-05
```

*Obrázek 12 - test normality dat pro filtr PP50; průtok*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlak_PP50_SB  
w = 0.98919, p-value = 0.6639
```

*Obrázek 13 - test normality dat pro filtr PP50\_SB; tlak*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlakovy.spad_PP50_SB  
w = 0.98181, p-value = 0.2345
```

*Obrázek 14 - test normality dat pro filtr PP50\_SB; tlakový spád*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: prutok_PP50_SB  
w = 0.96755, p-value = 0.02266
```

*Obrázek 15 - test normality dat pro filtr PP50\_SB; průtok*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlak_PP50_SB_NANO  
w = 0.97609, p-value = 0.09216
```

*Obrázek 16 - test normality dat pro filtr PP50\_SB\_NANO12-45; tlak*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: tlakovy.spad_PP50_SB_NANO  
w = 0.97705, p-value = 0.1079
```

*Obrázek 17 - test normality dat pro filtr PP50\_SB\_NANO12-45; tlakový spád*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

#### shapiro-wilk normality test

```
data: prutok_PP50_SB_NANO  
w = 0.9785, p-value = 0.1371
```

*Obrázek 18 - test normality dat pro filtr PP50\_SB\_NANO12-45; průtok*

→ Nezamítám  $H_0$  na hladině významnosti  $\alpha$ .

## PŘÍLOHA 04

Dvouvýběrový F-test pro testování shody rozptylů dvou výběrových souborů. Vyhodnocení bylo provedeno na základě porovnání p-hodnoty s hladinou významnosti. Testování bylo provedeno na hladině významnosti 5%, tzn.  $\alpha=0,05$ . Pokud je p-hodnota menší než hladina významnosti je nulová hypotéza zamítnuta.

$H_0$ : Rozptyly jsou shodné.

$H_1$ : Rozptyly nejsou shodné.

Tabulka 1 - Dvouvýběrový F-test; PP25/PP25\_SB; tlak

|                                       | PP25                  | PP25_SB               |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                       | tlak [bar]            | tlak [bar]            |
| Stř. hodnota                          | 2,0030                | 1,9679                |
| Rozptyl                               | $4,44 \cdot 10^{-05}$ | $3,40 \cdot 10^{-05}$ |
| Pozorování                            | 91                    | 91                    |
| Rozdíl                                | 90                    | 90                    |
| F                                     | 1,3056                |                       |
| p-hodnota                             | 0,1039                |                       |
| F krit                                | 1,4171                |                       |
| Nezamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                       |                       |

Tabulka 2 - Dvouvýběrový F-test; PP25/PP25\_SB; tlakový spád

|                                       | PP25                  | PP25_SB               |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                       | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                          | 0,3295                | 0,3263                |
| Rozptyl                               | $2,10 \cdot 10^{-06}$ | $1,73 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                            | 91                    | 91                    |
| Rozdíl                                | 90                    | 90                    |
| F                                     | 1,2103                |                       |
| p-hodnota                             | 0,1835                |                       |
| F krit                                | 1,4171                |                       |
| Nezamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                       |                       |

Tabulka 3 - Dvouvýběrový F-test; PP25/PP25\_SB; průtok

|                                       | PP25                                    | PP25_SB                                 |
|---------------------------------------|---|---|
|                                       | Průtok [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ] | Průtok [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ] |
| Stř. hodnota                          | 7,7874                                  | 7,6974                                  |
| Rozptyl                               | 0,0001                                  | 0,0001                                  |
| Pozorování                            | 91                                      | 91                                      |
| Rozdíl                                | 90                                      | 90                                      |
| F                                     | 1,0009                                  |   |
| p-hodnota                             | 0,4983                                  |   |
| F krit                                | 1,4171                                  |   |
| Nezamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |   |   |

Tabulka 4 - Dvouvýběrový F-test; PP50/PP50\_SB; tlak

|                                       | PP50       | PP50_SB    |
|---------------------------------------|------------|------------|
|                                       | tlak [bar] | tlak [bar] |
| Stř. hodnota                          | 1,9761     | 1,9368     |
| Rozptyl                               | 0,0001     | 0,0001     |
| Pozorování                            | 91         | 91         |
| Rozdíl                                | 90         | 90         |
| F                                     | 1,1963     |            |
| p-hodnota                             | 0,1984     |            |
| F krit                                | 1,4171     |            |
| Nezamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |            |            |

Tabulka 5 - Dvouvýběrový F-test; PP50/PP50\_SB; tlakový spád

|                                       | PP50_SB               | PP50                  |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                       | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                          | 0,3298                | 0,3334                |
| Rozptyl                               | $5,89 \cdot 10^{-06}$ | $5,83 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                            | 91                    | 91                    |
| Rozdíl                                | 90                    | 90                    |
| F                                     | 1,0092                |                       |
| p-hodnota                             | 0,4826                |                       |
| F krit                                | 1,4171                |                       |
| Nezamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                       |                       |



Tabulka 6 - Dvouvýběrový F-test; PP50/PP50\_SB; průtok

|                                     | PP50                        | PP50_SB                     |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                     | Průtok [l.s <sup>-1</sup> ] | Průtok [l.s <sup>-1</sup> ] |
| Stř. hodnota                        | 7,7363                      | 7,6453                      |
| Rozptyl                             | 0,0004                      | 0,0001                      |
| Pozorování                          | 91                          | 91                          |
| Rozdíl                              | 90                          | 90                          |
| F                                   | 3,6891                      |                             |
| p-hodnota                           | $1,15 \cdot 10^{-09}$       |                             |
| F krit                              | 1,4171                      |                             |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                             |                             |

Tabulka 7 - Dvouvýběrový F-test; PP25/PP25\_SB\_NANO12-45; tlak

|                                     | PP25_SB_NANO          | PP25                  |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                     | Tlak [bar]            | Tlak [bar]            |
| Stř. hodnota                        | 2,5191                | 2,0030                |
| Rozptyl                             | 0,0002                | $4,44 \cdot 10^{-05}$ |
| Pozorování                          | 91                    | 91                    |
| Rozdíl                              | 90                    | 90                    |
| F                                   | 3,4096                |                       |
| p-hodnota                           | $8,77 \cdot 10^{-09}$ |                       |
| F krit                              | 1,4171                |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                       |                       |

Tabulka 8 - Dvouvýběrový F-test; PP25/PP25\_SB\_NANO12-45; tlakový spád

|                                     | PP25_SB_NANO          | PP25                  |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                     | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                        | 0,9827                | 0,3295                |
| Rozptyl                             | 0,0003                | $2,10 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                          | 91                    | 91                    |
| Rozdíl                              | 90                    | 90                    |
| F                                   | 134,8762              |                       |
| p-hodnota                           | $3,85 \cdot 10^{-71}$ |                       |
| F krit                              | 1,4171                |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                       |                       |

Tabulka 9 - Dvouvýběrový F-test; PP25/PP25\_SB\_NANO12-45; průtok

|                                      | PP25                        | PP25_SB_NANO                |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                      | Průtok [l.s <sup>-1</sup> ] | Průtok [l.s <sup>-1</sup> ] |
| Stř. hodnota                         | 7,7874                      | 7,4641                      |
| Rozptyl                              | 0,0001                      | 0,0001                      |
| Pozorování                           | 91                          | 91                          |
| Rozdíl                               | 90                          | 90                          |
| F                                    | 1,5928                      |                             |
| p-hodnota                            | 0,0142                      |                             |
| F krit                               | 1,4171                      |                             |
| Zamítám H <sub>0</sub> na hladině α. |                             |                             |

Tabulka 10 - Dvouvýběrový F-test; PP50/PP50\_SB\_NANO12-45; tlak

|                                      | PP50       | PP50_SB_NANO |
|--------------------------------------|------------|--------------|
|                                      | Tlak [bar] | Tlak [bar]   |
| Stř. hodnota                         | 1,9761     | 2,0036       |
| Rozptyl                              | 0,0001     | 0,0001       |
| Pozorování                           | 91         | 91           |
| Rozdíl                               | 90         | 90           |
| F                                    | 1,9287     |              |
| p-hodnota                            | 0,0010     |              |
| F krit                               | 1,4171     |              |
| Zamítám H <sub>0</sub> na hladině α. |            |              |

Tabulka 11 - Dvouvýběrový F-test; PP50/PP50\_SB\_NANO12-45; tlakový spád

|                                      | PP50_SB_NANO          | PP50                  |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                      | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                         | 0,3685                | 0,3334                |
| Rozptyl                              | $3,23 \cdot 10^{-05}$ | $5,83 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                           | 91                    | 91                    |
| Rozdíl                               | 90                    | 90                    |
| F                                    | 5,5418                |                       |
| p-hodnota                            | $8,32 \cdot 10^{-15}$ |                       |
| F krit                               | 1,4171                |                       |
| Zamítám H <sub>0</sub> na hladině α. |                       |                       |

Tabulka 12 - Dvouvýběrový  $F$ -test; PP50/PP50\_SB\_NANO12-45; průtok

|                                     | PP50                        | PP50_SB_NANO                |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                     | Průtok [l.s <sup>-1</sup> ] | Průtok [l.s <sup>-1</sup> ] |
| Stř. hodnota                        | 7,7363                      | 7,7130                      |
| Rozptyl                             | 0,0004                      | $4,40 \cdot 10^{-05}$       |
| Pozorování                          | 91                          | 91                          |
| Rozdíl                              | 90                          | 90                          |
| F                                   | 9,3895                      |                             |
| p-hodnota                           | $1,21 \cdot 10^{-22}$       |                             |
| F krit                              | 1,4171                      |                             |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ . |                             |                             |

## PŘÍLOHA 05

Dvouvýběrový t-test pro testování shody středních hodnot dvou nezávislých výběrů pocházejících z normálního rozdělení. Vyhodnocení bylo provedeno na základě porovnání p-hodnoty s hladinou významnosti. Testování bylo provedeno na hladině významnosti 5%, tzn.  $\alpha=0,05$ . Pokud je p-hodnota menší než hladina významnosti je nulová hypotéza zamítnuta.

$H_0$ : Střední hodnoty jsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy nemělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie nemá na testované veličiny vliv.)

$H_1$ : Střední hodnoty nejsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy mělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie má na testované veličiny vliv.)

Tabulka 1 - Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů; PP25/PP25\_SB; tlak

| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|
|   | PP25                  | PP25_SB               |
|   | Tlak [bar]            | Tlak [bar]            |
| Stř. hodnota                            | 2,0030                | 1,9679                |
| Rozptyl                                 | $4,44 \cdot 10^{-05}$ | $3,40 \cdot 10^{-05}$ |
| Pozorování                              | 91                    | 91                    |
| Společný rozptyl                        | $3,92 \cdot 10^{-05}$ |                       |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                 | 0                     |                       |
| Rozdíl                                  | 180                   |                       |
| t                                       | 37,8589               |                       |
| p-hodnota                               | $1,20 \cdot 10^{-87}$ |                       |
| t krit                                  | 1,9732                |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .     |                       |                       |

Tabulka 2 - Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů; PP25/PP25\_SB; tlakový spád

| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|
|   | PP25                  | PP25_SB               |
|   | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                            | 0,3295                | 0,3263                |
| Rozptyl                                 | $2,10 \cdot 10^{-06}$ | $1,73 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                              | 91                    | 91                    |
| Společný rozptyl                        | $1,92 \cdot 10^{-06}$ |                       |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                 | 0                     |                       |
| Rozdíl                                  | 180                   |                       |
| t                                       | 15,6966               |                       |
| p-hodnota                               | $1,53 \cdot 10^{-35}$ |                       |
| t krit                                  | 1,9732                |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .     |                       |                       |

Tabulka 3 - Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů; PP25/PP25\_SB; průtok

| Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů |   |   |
|---|---|---|
|   | PP25                                      | PP25_SB                                   |
|   | průtok [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ] | průtok [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ] |
| Stř. hodnota                              | 7,7874                                    | 7,6974                                    |
| Rozptyl                                   | $9,59 \cdot 10^{-05}$                     | $9,58 \cdot 10^{-05}$                     |
| Pozorování                                | 91  | 91  |
| Společný rozptyl                          | 9,59E-05                                  |   |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                   | 0   |   |
| Rozdíl                                    | 180                                       |   |
| t   | 62,0130                                   |   |
| p-hodnota                                 | $2,10 \cdot 10^{-123}$                    |   |
| t krit                                    | 1,9732                                    |   |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .       |   |   |

Tabulka 4 - Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů; PP50/PP50\_SB; tlakový spád

| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|
|   | PP50                  | PP50_SB               |
|   | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                            | 0,3298                | 0,3334                |
| Rozptyl                                 | $5,89 \cdot 10^{-06}$ | $5,83 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                              | 91                    | 91                    |
| Společný rozptyl                        | $5,86 \cdot 10^{-06}$ |                       |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                 | 0                     |                       |
| Rozdíl                                  | 180                   |                       |
| t                                       | -9,9055               |                       |
| p-hodnota                               | $9,76 \cdot 10^{-19}$ |                       |
| t krit                                  | 1,9732                |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .     |                       |                       |

Tabulka 5 - Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů; PP25/PP25\_SB\_NANO12-45; tlak

| Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů |                        |                       |
|---|------------------------|-----------------------|
|   | PP25_SB_NANO           | PP25                  |
|   | Tlak [bar]             | Tlak [bar]            |
| Stř. hodnota                              | 2,5191                 | 2,0030                |
| Rozptyl                                   | $1,51 \cdot 10^{-04}$  | $4,44 \cdot 10^{-05}$ |
| Pozorování                                | 91                     | 91                    |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                   | 0                      |                       |
| Rozdíl                                    | 139                    |                       |
| t   | 351,7981               |                       |
| p-hodnota                                 | $6,32 \cdot 10^{-207}$ |                       |
| t krit                                    | 1,9772                 |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .       |                        |                       |

Tabulka 6 - Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů; PP25/PP25\_SB\_NANO12-45; tlakový spád

| Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů |                        |                       |
|---|------------------------|-----------------------|
|   | PP25_SB_NANO           | PP25                  |
|   | Tl. spád [bar]         | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                              | 0,9827                 | 0,3295                |
| Rozptyl                                   | $2,83 \cdot 10^{-04}$  | $2,10 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                                | 91                     | 91                    |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                   | 0                      |                       |
| Rozdíl                                    | 91                     |                       |
| t   | 368,9489               |                       |
| p-hodnota                                 | $2,82 \cdot 10^{-146}$ |                       |
| t krit                                    | 1,9864                 |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .       |                        |                       |

Tabulka 7 - Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů; PP25/PP25\_SB\_NANO12-45; průtok

| Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů |   |   |
|---|---|---|
|   | PP25_SB_NANO                              | PP25                                      |
|   | Průtok [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ] | Průtok [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ] |
| Stř. hodnota                              | 7,7874                                    | 7,4641                                    |
| Rozptyl                                   | $9,59 \cdot 10^{-05}$                     | $6,02 \cdot 10^{-05}$                     |
| Pozorování                                | 91  | 91  |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                   | 0   |   |
| Rozdíl                                    | 171                                       |   |
| t   | 246,8377                                  |   |
| p-hodnota                                 | $3,16 \cdot 10^{-220}$                    |   |
| t krit                                    | 1,9739                                    |   |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .       |   |   |

Tabulka 8 - Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů; PP50/PP50\_SB\_NANO12-45; tlakový spád

| Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|
|   | PP50_SB_NANO          | PP50                  |
|   | Tl. spád [bar]        | Tl. spád [bar]        |
| Stř. hodnota                              | 0,3685                | 0,3334                |
| Rozptyl                                   | $3,23 \cdot 10^{-05}$ | $5,83 \cdot 10^{-06}$ |
| Pozorování                                | 91                    | 91                    |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot                   | 0                     |                       |
| Rozdíl                                    | 121                   |                       |
| t   | 54,2053               |                       |
| p-hodnota                                 | $9,94 \cdot 10^{-87}$ |                       |
| t krit                                    | 1,9798                |                       |
| Zamítám $H_0$ na hladině $\alpha$ .       |                       |                       |



## PŘÍLOHA 06

Dvouvýběrový Wilcoxonův test pro testování shody mediánových hodnot dvou nezávislých výběrů, které nepocházejí z normálního rozdělení. Vyhodnocení bylo provedeno na základě porovnání p-hodnoty s hladinou významnosti. Testování bylo provedeno na hladině významnosti 5%, tzn.  $\alpha=0,05$ . Pokud je p-hodnota menší než hladina významnosti je nulová hypotéza zamítnuta.

$H_0$ : Mediánové hodnoty jsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy nemělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie nemá na testované veličiny vliv.)

$H_1$ : Mediánové hodnoty nejsou stejné. (Přidání nanovlákněné vrstvy mělo na měřené veličiny vliv./ Použití spunbondu jako podkladové textilie má na testované veličiny vliv.)

```
wilcoxon rank sum test
data: tlak_PP50 and tlak_PP50_SB
W = 8275, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

*Obrázek 1 - Dvouvýběrový Wilcoxonův test; PP50/PP50\_SB; tlak*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině  $\alpha$ .

```
wilcoxon rank sum test
data: prutok_PP50 and prutok_PP50_SB
W = 8281, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

*Obrázek 2 - Dvouvýběrový Wilcoxonův test; PP50/PP50\_SB; průtok*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině  $\alpha$ .

```
wilcoxon rank sum test  
data: tlak_PP50 and tlak_PP50_SB_NANO  
W = 225.5, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

*Obrázek 3 - Dvouvýběrový Wilcoxonův test; PP50/PP50\_SB\_NANO12-45; tlak*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině  $\alpha$ .

```
wilcoxon rank sum test  
data: prutok_PP50 and prutok_PP50_SB_NANO  
W = 7495, p-value < 2.2e-16  
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

*Obrázek 4 - Dvouvýběrový Wilcoxonův test; PP50/PP50\_SB\_NANO12-45; průtok*

→ Zamítám  $H_0$  na hladině  $\alpha$ .